
EVALUATION DE LA MOBILITE ET DE LA PHYTODISPONIBILITE DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES SOLS

Etude réalisée sur les sols de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST), en perspective d'une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration.

Blanche COLLIN
Emmanuel DOELSCH

Mai 2008

SOMMAIRE

RESUME.....	3
1. INTRODUCTION.....	5
2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE	7
2.1 Législation et normes en vigueur	7
2.2 Des possibilités de dérogations	8
2.3 Démarche pour une étude de dérogation.....	8
3. MATERIAUX ET METHODES	11
3.1 La stratégie d'échantillonnage	11
3.1.1 Les zones potentiellement épanchables	11
3.1.2 L'assolement	12
3.1.3 Les types de sol	14
3.2 Méthodes de prélèvements et d'analyses	18
3.2.1 Les sols	18
3.2.2 Canne à sucre	20
4. ORIGINE DES TENEURS TOTALES EN ETM DANS LES SOLS.....	23
4.1 Etude de la population totale des sols	23
4.2 Aspect réglementaire.....	25
4.2.1 pH.....	25
4.2.2 ETM	26
4.3 Origine des concentrations en ETM à la Réunion.....	27
4.4 Sur quels éléments traces métalliques porte la dérogation ?.....	30
4.4.1 Les valeurs seuils du Ni, Cr et Cu.....	31
4.4.2 La valeur seuil du Zn.....	31
5. LA MOBILITE DES ETM	33
5.1 Le concept de mobilité	33
5.2 Essai de lixiviation	34
5.2.1 Résultats et discussion.....	34
5.2.2 Etude du cas particulier	35
6. LA PHYTODISPONIBILITE DES ETM.....	37
6.1 Le concept de biodisponibilité	37
6.2 Extraction chimique	37
6.3 Analyse des cannes à sucre cultivées au champ.....	38
6.3.1 Résultats	38
6.3.2 Discussion	40
7. CONCLUSION	45
8. LISTE DES FIGURES	49
9. LISTE DES TABLEAUX.....	51
10. ANNEXES	53

RESUME

L'épandage des boues urbaines est soumis au décret du 7 décembre 1997 et à l'arrêté du 8 janvier 1998 qui impose des teneurs totales en éléments traces métalliques (ETM) maximales dans les sols. Or, de nombreux sols, développés sur des matériaux volcaniques du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise, présentent des teneurs en nickel, chrome et cuivre supérieures aux valeurs seuils. L'épandage des boues ne peut donc être autorisé sur ces sols sans un contrôle de la mobilité et de la phytodisponibilité des ETM.

Ce travail a pour objectif d'évaluer la mobilité et la phytodisponibilité des ETM des sols de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST), en s'appuyant sur le guide technique édité par l'ADEME et l'APCA : *«Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ? »*.

Nous avons échantillonné 59 sols, sous culture de canne à sucre, en prenant en compte tous les types de sols développés sur la zone d'étude. Sur chacun des échantillons, nous avons effectué : une analyse des teneurs totales en Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn, un essai de lixiviation pour évaluer la mobilité et une extraction chimique pour évaluer la phytodisponibilité. Pour compléter cette approche chimique, nous avons prélevé 50 échantillons de canne à sucre sur les parcelles échantillonnées, et analysé Ni, Cr et Cu dans la bagasse et dans le jus.

Les résultats montrent que les fortes teneurs en Cr, Ni, Cu mesurées dans les sols sont d'origine naturelle. Ces ETM présents dans les sols sont principalement issus de l'héritage des roches mères altérées et les concentrations élevées correspondent au fond pédogéochimique naturel. Une demande de dérogation ne peut porter que sur ces éléments.

Les quantités de Cr, Ni, Cu extraites par l'essai de lixiviation et par l'extraction chimique sont inférieures aux seuils d'investigation présentés dans le guide technique « Dérogations ETM ». La mobilité et la phytodisponibilité de ces éléments est donc faible. Les analyses effectuées sur les cannes à sucre confirment ce résultat. En effet, les cannes à sucre qui se développent sur des sols très riches en ETM, n'absorbent pas plus d'ETM que les cannes à sucre qui se développent sur des sols moins riches.

Sur la base des résultats scientifiques de cette étude, une demande de dérogation est envisageable.

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la population réunionnaise s'accompagne tout naturellement d'une forte augmentation de la production de déchets et de l'utilisation des ressources telles que l'eau. L'assainissement des eaux usées à La Réunion, sous-dimensionné ou inexistant, est amené à se développer rapidement. Au cours des prochaines années, la production de boues d'épuration devrait augmenter très fortement (production en 2000 : 1730 tonnes de Matière Sèche/an ; estimation de la production de boues en 2010 : 10 000 tMS/an). Le problème de la gestion de ces déchets organiques deviendra alors prégnant. Parmi les solutions de gestion, le recyclage agricole permet, grâce au pouvoir épurateur des sols, la valorisation de déchets organiques d'origines variées : agricole (lisiers, fumiers, fientes), agro-industrielle (vinasses) et urbaine (boues de station d'épuration).

La pratique de l'épandage agricole des boues d'épuration bénéficie en France d'un cadre réglementaire rigoureux dont l'un des principes est la protection contre les risques de contamination du sol et des milieux (écosystèmes, agrosystèmes, eaux continentales). Ainsi, pour limiter le risque lié aux éléments traces métalliques (ETM), l'épandage est interdit dans le cas de boues d'épuration trop chargées en ETM ou sur des sols déjà riches.

A La Réunion, la connaissance des concentrations en ETM des sols et de certains déchets organiques est relativement récente (Doelsch, 2003) :

- en ce qui concerne les boues d'épuration, nous avons montré que les concentrations en ETM sont relativement faibles et significativement inférieures aux valeurs réglementaires (Doelsch, 2004; Doelsch et al., 2006a) ;
- pour les sols de La Réunion, la situation est différente (Doelsch et al., 2006b; Doelsch et al., 2006c). Ainsi, comme le montre le tableau 1, les concentrations moyennes en chrome et nickel déterminées pour certains sols de La Réunion sont souvent supérieures aux valeurs seuils fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998 (arrêté fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues urbaines sur les sols agricoles).

Tableau 1 : comparaison de la concentration moyenne en ETM (mg.kg^{-1}) des sols de La Réunion avec les valeurs seuils réglementaires.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
Valeurs Seuils (réglementation)	2	150	100	1	50	300
Moyenne sols Réunion (n=98)	0.29	310	63	0.21	211	159
Pourcentage d'échantillons > valeurs seuils	0%	61%	18%	0%	81%	3%

Cependant, des possibilités de dérogation sont mentionnées dans la réglementation pour des dépassements de seuils en ETM dans les sols. Ainsi l'article 11 de l'arrêté du 8 janvier 1998 précise : « Des dérogations [...aux valeurs limites prévues...] peuvent toutefois être accordées par le préfet sur la base d'études du milieu concerné montrant que les éléments traces métalliques des sols ne sont ni mobiles, ni biodisponibles ».

Plan du document :

Il nous a semblé nécessaire, dans un premier chapitre, de rappeler le contexte réglementaire dans lequel s'inscrit ce projet : les décrets et arrêtés régissant la valorisation agricole des boues urbaines, la possibilité de dérogation des valeurs seuils en ETM.

La seconde partie de ce document présente la stratégie d'échantillonnage choisie, l'ensemble des échantillons qui ont été étudiés (sols et végétaux) ainsi que les méthodes analytiques employées.

Les chapitres suivants abordent les résultats obtenus au cours de cette étude en distinguant :

- Les teneurs totales en ETM dans les sols
- L'étude de la mobilité des ETM
- L'étude de la phytodisponibilité des ETM

2. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

2.1 Législation et normes en vigueur

En France, l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées urbaines est réglementé par le décret du 8 décembre 1997 et son arrêté du 8 janvier 1998, pris en application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.

L'arrêté du 8 janvier 1998 concernant l'épandage agricole des boues urbaines prévoit des valeurs limites pour les éléments traces métalliques dans les sols soumis à épandage. L'épandage ne peut donc pas avoir lieu lorsque les teneurs en ETM (Tableau 1) dépassent l'une des valeurs limites figurant dans les tableaux inclus dans les annexes de ces textes (article 11 de l'arrêté du 8 janvier 1998).

Au niveau européen, c'est la directive 86/278/CEE du Conseil du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture qui fixe les valeurs limites en ETM dans les sols. Cependant, une révision complète des dispositions de la directive est en cours. Le projet de révision de directives européennes (Working document on sludge 3rd draft – 2000) inclus également des valeurs limites prenant en compte le pH du sol. (Tableau 2). L'ensemble du document est consultable à l'adresse suivante : <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/sludge/workingdoc3.htm>.

Tableau 1 : Valeurs limites de concentration en ETM dans les sols destinés à l'épandage des boues de STEP (France et UE)

	Valeur limite (mg/kg MS)				
	Directive 86/278/EEC	Arrêté du 8 janvier 1998	Projet de révision de la directive européenne (2000)		
			5 ≤ pH < 6	6 ≤ pH < 7	pH ≥ 7
Cd	1-3	2	0,5	1	1,5
Cr	-	150	30	60	100
Cu	50-140	100	20	50	100
Hg	1-1,5	1	0,1	0,5	1
Ni	30-75	50	15	50	70
Pb	50-300	100	70	70	100
Zn	150-300	300	60	150	200

2.2 Des possibilités de dérogations

Plusieurs auteurs, (Juste, 1995, Baize, 2002) ont souligné les inconvénients de ces valeurs limites qui ne prennent pas en compte les contextes géologiques, pédologiques et climatologiques locaux. Dans la réglementation française, la seule propriété physico-chimique des sols retenue est le pH du sol puisqu'il est prévu que « les boues ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6 » (sauf dans le cas de boues chaulées où le pH doit être supérieur à 5). La réglementation prend en compte la question des sols dont les concentrations en ETM dépassent localement les valeurs seuils en offrant la possibilité de dérogations. Ainsi l'article 11 de l'arrêté du 8 janvier 1998 précise : « Des dérogations [...aux valeurs limites prévues...] peuvent toutefois être accordées par le préfet sur la base d'études du milieu concerné montrant que les éléments-traces métalliques des sols ne sont ni mobiles, ni biodisponibles ».

La mise en œuvre d'une demande de dérogation n'étant pas explicitée par les textes réglementaires, ce travail s'appuie sur un guide technique édité par l'ADEME et l'APCA : «Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ? » (ADEME, 2005)

2.3 Démarche pour une étude de dérogation

Le guide technique propose :

- Une méthodologie détaillée s'articulant autour de trois axes :
 - o la démonstration de l'origine naturelle, géologique ou pédogénétique des teneurs en ETM mesurés
 - o la mobilité du ou des éléments traces concernés
 - o l'étude de la biodisponibilité et du transfert possible des ETM dans les plantes
- Un inventaire des méthodes utilisables pour étayer chaque axe

La démarche à suivre pour mener une étude de dérogation est illustrée **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Avant d'étudier la mobilité et la phytodisponibilité, il est nécessaire d'avoir démontré l'origine naturelle des ETM dans les sols. Si les ETM sont mobiles ou phytodisponibles, la dérogation de peut être envisagée.

Si teneurs ETM > valeurs seuils et pH > 5 :

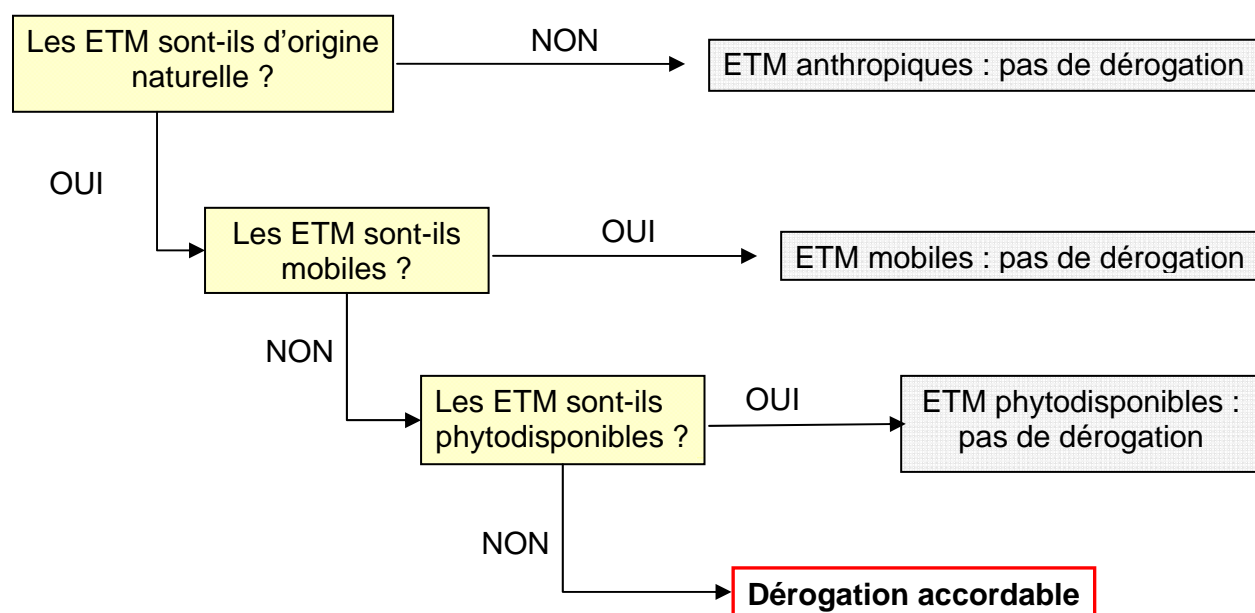


Figure 1 : Logigramme de décision (Guide Dérogations ETM, ADEME, APCA)

3. MATERIAUX ET METHODES

L'étude s'effectue sur les communes de la « CIREST » :

- Bras-Panon
- Saint André
- Sainte Rose
- Saint Benoît
- Salazie
- La plaine des palmistes

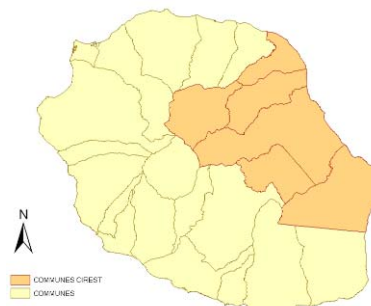


Figure 2 : La zone d'étude

3.1 La stratégie d'échantillonnage

L'un des points critique d'une stratégie d'échantillonnage est le choix des parcelles échantillonnées. Nous avons donc réduit la zone d'étude en prenant en compte :

- Les zones où l'épandage ne présente pas de risques, en se basant sur la réglementation,
- L'assolement,
- Le type de sol.

3.1.1 Les zones potentiellement épandables

La législation, qui régit l'épandage des boues d'épuration, précise dans l'annexe II de l'arrêté du 8 janvier 1998 des distances d'isolement à respecter. Ces distances d'isolement ont pour but de préserver la salubrité publique et la qualité des eaux souterraines, elles dépendent du type de boues, de la nature des activités à protéger et de la pente du terrain.

Pour déterminer la zone d'échantillonnage de cette étude, nous avons conservé les parcelles qui présentent un risque minimal, en respectant les distances d'isolement prescrites pour une « boue non stabilisée ou non solide ». Le décret du 8 décembre 1997 interdit l'épandage « sur les terrains en forte pente ». Nous avons donc, de manière arbitraire, supprimé de la zone d'échantillonnage les pentes supérieures à 20 %, ce qui nous a permis de construire la carte présentée sur la Figure 3.

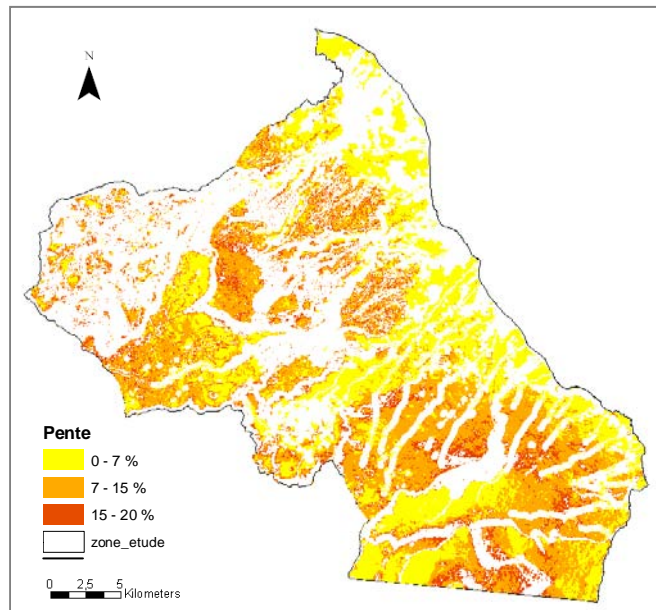


Figure 3 : Cartographie de la zone d'échantillonnage « potentiellement » épandable au vue des distances d'isolement précisées dans l'arrêté du 8 janvier 1998 pour des boues non stabilisées ou non solide. (Sources : IGN MNT, BD TOPO REUNION 97)

3.1.2 L'assolement

Le décret du 8 décembre 1997 interdit l'épandage « en dehors des terres régulièrement travaillées et des prairies normalement exploitées ».

Nous allons donc conserver uniquement les parcelles cultivées. L'assolement de la zone d'étude (Figure 4) est composé de 85% de cultures de cannes à sucre, de 10% de prairies et 5% de cultures variées (verger, banane...) (Données DAF 2006). La culture de la canne à sucre pourrait être propice à l'apport de boues d'épuration comme fertilisant. Nous avons choisi de limiter notre zone d'échantillonnage à la sole cannière.

Nous n'avons pas échantillonné dans les communes de Salazie et de la Plaine des palmistes. Pour cette dernière, les terres agricoles sont majoritairement utilisées en prairies et pâturages. Dans la commune de Salazie, les surfaces potentiellement épandables sont faibles, donc peu représentative du milieu. De plus, aucune station d'épuration n'est prévue à moyen terme sur ces zones.

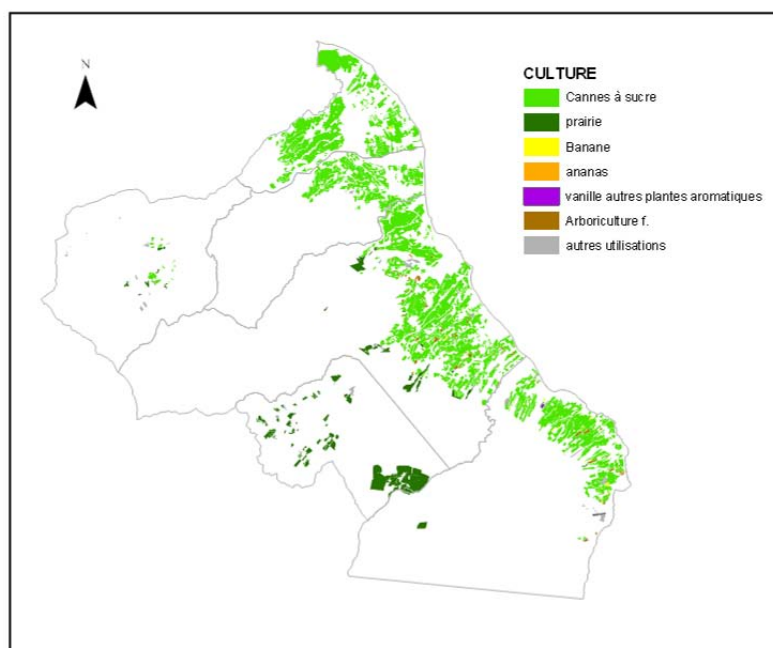


Figure 4 : Assolement de la zone d'étude. (Source DAF 2006)

Cartographie de la zone d'échantillonnage

Pour constituer notre zone d'échantillonnage finale, nous ne conservons que les zones agricoles cultivées en canne à sucre, desquelles nous retirons les zones non épanable du point de vue réglementaire (Figure 5).

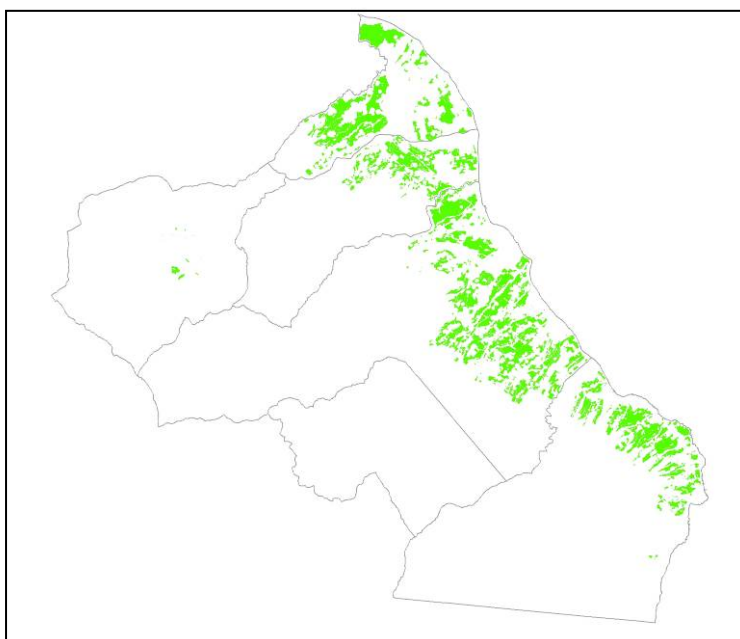


Figure 5 : Cartographie de la zone d'échantillonnage

Cette zone d'échantillonnage va nous permettre d'échantillonner les sols sur des parcelles qui pourraient, du point de vue de la réglementation en vigueur, être utilisées pour épandre des boues de station d'épuration. Cependant, cette zone « potentiellement » épandable n'est délimitée qu'à titre indicatif, pour une zone d'échantillonnage, et ne pourrait être utilisée directement pour un dossier d'épandage.

3.1.3 Les types de sol

La zone étudiée présente des types de sols différents. La pédogenèse, c'est-à-dire la formation des sols, est un phénomène complexe qui dépend à la fois de la nature de la roche mère, de l'orographie, de la végétation et de l'ensemble des paramètres climatologiques : précipitations, exposition ou non aux vents, température, altitude,...

L'Ile de La Réunion présente des variations très marquées de l'ensemble de ces paramètres (altitudes variant de 0 à 3000 m, pentes faibles à très fortes, pluviométrie variable selon l'exposition aux vents dominants). En ce qui concerne la roche mère, bien qu'elle soit de nature volcanique sur l'ensemble de l'île, elle présente de fortes variations de composition résultant de l'activité du Piton des Neiges puis de l'activité du Piton de la Fournaise.

En ce qui concerne l'échantillonnage des sols, il faut réussir à définir des zones qui une fois assemblées puissent être représentatives des situations rencontrées à la surface de l'île. Pour cela, nous avons utilisé le travail de (Raunet, 1991) qui est basé sur la notion d'unité de milieu (UM) : « une unité de milieu est définie par un matériau donné, soumis à un climat donné, affecté d'un modelé particulier, sur lequel s'est formé un sol spécifique couvert lui-même par une végétation caractéristique et affecté d'un certain fonctionnement hydrologique ». Cette définition a permis à l'auteur de définir 93 unités de milieu pour l'île de La Réunion réparties en 5 domaines.

Toutes les unités de milieu ne sont pas représentées sur la zone d'échantillonnage de cette étude, cependant les trois domaines les plus importants sont représentés :

1. Les unités de milieu sur matériaux volcaniques en place du Piton des neiges
2. Les unités de milieu sur matériaux volcaniques en place du Piton de la Fournaise
3. Les unités de milieu des formations superficielles mises en place par les eaux

Les deux autres domaines non traités dans cette étude sont les unités de milieu de haute altitude, et les unités de milieu des cirques.

Ces unités de milieu ont également permis de réaliser une cartographie morpho-pédologique (Figure 6).

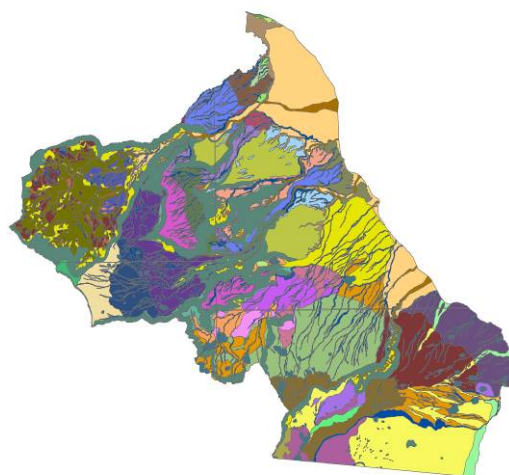


Figure 6 : Cartographie morpho-pédologique de la zone d'étude (Raunet, 1991)

Pour répartir d'une manière cohérente nos points d'échantillonnage, nous avons superposé la zone d'échantillonnage (Figure 5) à cette carte morpho-pédologique. A chaque type de sol caractérisé par une unité de milieu, nous obtenons une superficie « potentiellement » épandable. Nous avons alors réparti les points d'échantillonnage sur les différents types de sol, et de manière proportionnelle à la superficie « potentiellement » épandable. (Tableau 2, Tableau 3). Enfin, nous avons choisi les lieux d'échantillonnage de manière à couvrir d'une manière homogène le territoire (Figure 7).

Tableau 2 : Descriptions et nombre d'échantillons prélevés sur les sols issus des formations superficielles

Matériaux et situations morpho-climatiques			UM	Sol	Nbre éch.
formations superficielles mises en place par les eaux	alluvions à galets	cônes de déjections anciens	80	sol ferralitique faiblement désaturé	3
	alluvions à galets	cônes de déjection récents	82	sol peu différencié vitrique sur sable basaltiques et galets	11
	alluvions fines	plaines d'ennoyage entre cônes de déjection et bourrelets littoraux	85	sol peu évolué andique souvent hydromorphe limoneux	5

Tableau 3 : Descriptions et nombre d'échantillons prélevés sur les sols issus des matériaux volcaniques

	Nature et âge des émissions	Altitude	UM	Sol	Nbre éch.
sols issus des matériaux volcaniques non effondrés du Piton des Neiges	coulées phase III	basse altitude	16	sol ferralitique rouge fortement à moyennement désaturé	3
	coulées phase IV	basse altitude	17	sol ferralitique brun-rouge faiblement désaturé	1
	tufs et cendres phase VI sur coulées phase III et IV et coulées anciennes Fournaise	basse altitude	30	sol "faiblement ferralitique andique" brun-jaune épais sur cendres associé a des ressauts rocheux	2
		moyenne altitude	32	andosol désaturé perhydraté chromique sur cendres épaisses	1
		haute altitude	34	andosol désaturé perhydraté chromique sur cendres épaisses	1
	cendres phase VI	moyenne et haute altitude	41-42	sol brun andique caillouteux sur "gratons"	7
	coulées ignimbritiques phase VI	basse et moyenne altitude	43	andosol non perhydratés chromiques sur tuf ignimbritique	4
sols issus des matériaux volcaniques non effondrés du Piton de la Fournaise	matelassage de cendres assez épais sur coulées de la phase intermédiaire	moyenne altitude	47	andosol désaturé perhydraté sur cendres épaisses sur pente faible (<20%)	1
	saupoudrage de cendres peu épais sur coulées de la phase intermédiaire	basse altitude	49-50	andosol désaturé perhydraté chromique sur cendres associées à de nombreux gratons (pentes faibles à modérées)	9
	phase IV avec piégeage de cendres peu épais et discontinu	basse et moyenne altitude	54	gratons à sol brun andique peu épais associés à andosol non perhydraté sur cendres peu épaisses	9
		haute altitude	56	andosol désaturé perhydraté chromique sur cendres associées à de nombreux gratons	1
	recouvrement de lapilli	moyenne et haute altitude	60	andosol vitrique associé à des andosols perhydraté sur cendres	1

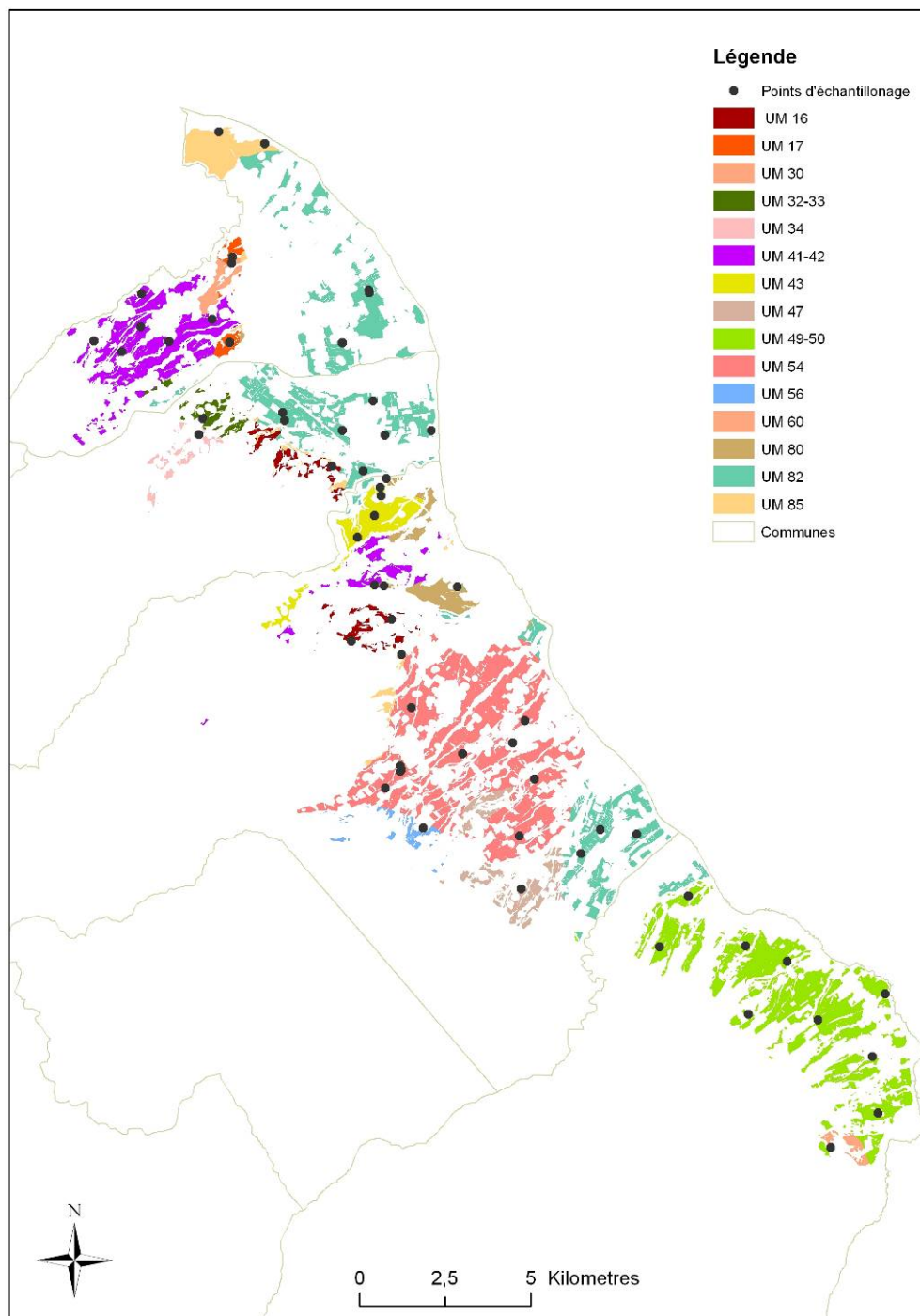


Figure 7 : Répartition des points d'échantillonnage

3.2 Méthodes de prélèvements et d'analyses

Afin d'éviter toute contamination des échantillons, les outils employés dans le cadre de cette étude étaient soit en inox (gouge) soit en plastique. Tous les flacons et ustensiles destinés à manipuler le sol, contenir la solution d'extraction, la suspension de sol et les filtrats, ont été lavés à l'acide nitrique 0,1 mol.L⁻¹.

3.2.1 Les sols

3.2.1.1 Echantillonnage des sols

Les méthodes d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des sols sont précisées dans l'arrêté du 8 janvier 1998.

Il est précisé dans cet arrêté que : « *Les prélèvements de sol doivent être effectués dans un rayon de 7,50 mètres autour du point de référence repéré par ses coordonnées Lambert, à raison de 16 prélèvements élémentaires pris au hasard dans le cercle ainsi dessiné [...] Les modalités d'exécution des prélèvements élémentaires et de constitution et conditionnement des échantillons sont conformes à la norme NF X 31 100.* »

Les sols ont été prélevés conformément au protocole énoncé dans la norme NF X 31 100. Un minimum de 16 prélèvements élémentaires a été effectué à l'aide d'une gouge dans chaque parcelle. L'échantillonnage des sols a eu lieu d'avril à juillet 2007.

Pour chaque prélèvement, nous avons rencontré l'agriculteur afin de connaître l'itinéraire technique de la culture (apport d'engrais, chaulage, épandage de matière organique, etc.).

3.2.1.2 Analyses physico-chimiques et teneurs totales en ETM

Une fois prélevés, les sols sont conservés à une température de 4° C et subissent une première série de caractérisations au Laboratoire de Biologie et Géochimie des Sols du CIRAD (Réunion). Il s'agit notamment de la détermination de l'humidité et des valeurs de pH_{H2O}. Après conditionnement, les échantillons sont envoyés au laboratoire d'analyses du CIRAD à Montpellier (laboratoire certifié ISO 9002 par l'Afaq) pour la détermination des concentrations en ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn).

L'humidité des sols

$$TH(\%) = \left[\frac{Ph - Ps}{Ps} \right] * 100$$

L'humidité des sols (TH) est déterminée par la formule suivante :

avec Ph, le poids « humide » (ou frais) de l'échantillon et Ps, le poids sec. Ce dernier est déterminé après passage dans une étuve à 105°C pendant 24h. Une vérification est obtenue pour Ps par une seconde mesure effectuée à t=24+4 heures. La mesure est validée si Ps(24h)-Ps(24+4h)<0,5%.

Le potentiel hydrogène

Le pH_{H2O} a été mesuré dans une solution avec un rapport sol/solution=1/5. Une fois le sol séché à l'air, broyé et tamisé (2 mm), 10 ml de sol ont été placés au contact de 50 ml d'eau distillée. La mesure du pH a été effectuée avec une électrode combinée Schott blue line 23 pH à électrolyte gélifiée (multimètre VWR). Un sol témoin de La Bretagne a été utilisé pour vérifier la répétitivité et la justesse des mesures tous les dix échantillons.

Dosage des ETM

L'étape préalable au dosage des ETM réside dans la mise en solution des échantillons. La mise en solution est réalisée par attaque acide selon la norme NF X31-147 (1996). 0,2 g de sols sont calcinés à 500°C (lorsque MO>5%) puis dissous dans un mélange acide nitrique, acide perchlorique et acide fluorhydrique jusqu'à sec. Reprise par de l'acide chlorhydrique.

Le dosage des teneurs est effectué par ICP OES (Inducted Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy). Le spectromètre, de marque VARIAN VISTA, est équipé du détecteur CCD (Coupled Charge Device) qui autorise la détermination simultanée, à plusieurs longueurs d'ondes, de tous les éléments de la classification périodique des éléments à l'exception des corps gazeux. Des échantillons références certifiés sont analysés de la même façon à raison de 1 pour 20 échantillons au minimum. Les résultats sont ainsi estimés à ± 15% pour le Cd et le Pb et ± 10% pour les autres éléments.

Le Hg est sous-traité au laboratoire de la SADEF et déterminé par la méthode vapeur froide sur analyseur AMA 254.

3.2.1.3 La mobilité des ETM : essai de lixiviation

Plusieurs méthodes expérimentales existent pour évaluer la mobilité des éléments traces métalliques. Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé la méthode prescrite dans le guide technique Dérogation ETM : un essai de lixiviation référencée sous la norme **NF ISO 21268**.

Un échantillon de sol frais, mis en contact avec le lixiviant (eau additionnées de CaCl₂ à 0,001 mol.L⁻¹) est mis sous agitation pendant 24 heures à 10 tours/min. Le rapport liquide/solide est de 10 L/kg de matière sèche.

Le résidu solide est ensuite séparé par centrifugation (2500g pendant 20 min) puis par filtration en utilisant un filtre à membrane (Minisart, PES) de 0,45 µm.

Le pH, la conductivité et le potentiel d'oxydoréduction ont été mesurés pour chaque échantillon. Nous avons ajouté 10% de HNO₃ et 0,1% de NaN₃ afin de conserver l'échantillon, conditionné dans des flacons en polyéthylène de 50 ml, et conservé avant analyses à 4°C.

L'essai de lixiviation a été effectué sur les 59 échantillons de sol, avec 3 répétitions par échantillons. Un essai à blanc a été réalisé pour chaque série de manipulation afin de contrôler la manière dont l'ensemble du mode opératoire est appliqué.

Les échantillons ont été analysés au laboratoire des sols de l'INRA d'Arras. Le laboratoire a mesuré les éléments traces métalliques suivants : Cr, Cu, Ni, Zn, par ICP MS (Inducted Coupled Plasma-Mass Spectroscopy) ou ICP AES. Les limites de détection en µg.L⁻¹ sont les suivantes : Cr : 0,2 ; Cu : 1 ; Ni : 0,5 ; Zn : 30.

3.2.1.4 La phytodisponibilité des ETM : essai d'extraction chimique

Pour estimer la phytodisponibilité des ETM, il existe différentes méthodes chimiques, basées notamment sur des extractions au moyen de solutions salines ou de chélatants. La méthode conseillée par le guide Dérogation ETM est une méthode d'extraction au nitrate d'ammonium (*normalisation en cours*).

Les échantillons de sol sont séchés à l'air libre et tamisés à 2mm selon la norme NF ISO 11464. La prise d'essai de 20 g de terre, ajoutée à 50 ml de la solution NH₄NO₃ à 1 mol.L⁻¹ est agitée pendant 2 heures à 30 tours/min. Le résidu solide est ensuite séparé par centrifugation (1000 g pendant 15 min) puis par filtration en utilisant un filtre à membrane (Minisart, PES) de 0,22 µm.

Nous avons ajouté 10% de HNO₃ et 0,1% de NaN₃ afin de conserver l'échantillon, conditionné dans des flacons en polyéthylène de 50 ml, et conservé avant analyses à 4°C. L'essai de lixiviation a été effectué sur les 59 échantillons de sol, à raison de 3 répliques par échantillon. Un essai à blanc a été réalisé pour chaque série de manipulation afin de contrôler la manière dont l'ensemble du mode opératoire est appliqué.

Les échantillons sont analysés à l'ICP OES au laboratoire du CIRAD de Montpellier. Les limites de détection sont les suivantes en µg.L⁻¹ : Cr : 1 ; Ni : 1 ; Cu : 1.

3.2.2 Canne à sucre

Les tiges de canne à sucre ont été prélevées sur 50 des parcelles sélectionnées. Afin d'obtenir des échantillons comparables, l'âge des repousses était compris entre 11 et 12 mois. Le prélèvement s'est effectué de juillet à décembre 2007.

Nous avons prélevé des cannes de variété R 570 et R 579. Sur chaque parcelle, nous avons prélevé 5 tiges entières de canne à sucre. Ces tiges ont été lavées afin d'éviter toutes contaminations dues à l'apport de sol. Les tiges sont broyées puis pressées pour récupérer le jus et la bagasse, au laboratoire du CERF.

Une fraction des échantillons est conservée afin de déterminer le taux de matière sèche (MS exprimée en %) selon la formule : $MS(\%) = \left[\frac{Ps}{Ph} \right] * 100$, avec Ph, le poids « humide » (ou frais) de l'échantillon et Ps, le poids sec. Ce dernier est déterminé après passage dans une étuve à 105°C pendant 24h. Une vérification est obtenue pour Ps par une seconde mesure effectuée à t=24+4 heures. La mesure est validée si $Ps_{(24h)} - Ps_{(24+4h)} < 0,5\%$.

La phase de minéralisation des échantillons végétaux est entreprise par voie sèche et destruction de la silice par HF. 500 mg de matériel végétal préalablement séché, sont introduits dans une capsule en platine. La capsule est placée dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 500°C et qui est ainsi maintenue pendant 2 heures. Un pallier est effectué aux alentours de 200°C jusqu'à la fin du dégagement de fumées. Une étape supplémentaire est ajoutée au protocole de simple minéralisation qui consiste à détruire la silice contenue dans les cendres en ajoutant de l'acide fluorhydrique, les composés SiF₆ étant volatils. La reprise des cendres est réalisée en deux étapes, l'acidité finale correspond à 3 ml d'acide HCl 6N pour 50ml. Les solutions sont prêtes à analyser par ICP OES. Les résultats sont estimés à ± 15% pour le Cd et le Pb et ± 10% pour les autres.

Remarque : les concentrations en ETM sont toujours exprimées en mg.kg⁻¹ ou ppm de M.S. sauf mention contraire.

4. ORIGINE DES TENEURS TOTALES EN ETM DANS LES SOLS

Dans cette partie, nous présenterons d'abord les résultats de l'ensemble de la population des sols. Nous allons ensuite démontrer l'origine naturelle des éléments traces métalliques dans les sols afin de savoir pour quels ETM la dérogation peut être demandée.

4.1 Etude de la population totale des sols

A partir de l'ensemble des échantillons analysés, nous allons dans les paragraphes suivants, présenter des résultats généraux basés sur une étude statistique simplifiée. La population totale comprend 59 échantillons. Chaque échantillon est caractérisé par les concentrations en Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Hg et par le pH_{H2O}.

Le Tableau 4 présente de manière synthétique les caractéristiques de chacune des variables analytiques à l'aide des paramètres suivants : minimum, 1^{er} quartile, médiane, moyenne, 3^{ème} quartile et maximum. Les quartiles indiquent la répartition des valeurs, 25 % des valeurs sont inférieures au 1^{er} quartile et 75 % des valeurs sont inférieures au 3^{ème} quartile. Nous avons précisé le nombre d'échantillons pris en compte pour l'analyse statistique : « N Actifs ». Certains sols ont une teneur en Pb inférieur à la limite de détection de l'appareil utilisé.

La distribution des données est représentée sous la forme de « boîtes à moustaches » sur lesquelles sont surimposées l'ensemble des données numériques (Figure 8).

Tableau 4 : Caractéristiques de la population totale des sols.

	pH _{H2O}	Cu	Zn	Pb	Ni mg.kg ⁻¹	Cr	Cd	Hg
N Actifs	59	59	59	45	59	59	59	59
Min	4,47	4,65	105	1,27	11,0	45,5	0,07	0,03
1^{er} Quart.	5,07	42,4	131	3,36	77	160	0,13	0,09
Médiane	5,45	70,53	144	4,97	174	300	0,19	0,18
Moyenne	5,47	67,20	157	9,07	210	339	0,20	0,18
3^{ème} Quart.	5,83	90,7	170	9,07	288	486	0,25	0,25
Max	7,11	133	536	93,4	1000	974	0,57	0,43
<i>Moyenne des sols mondiaux^a</i>		25	64	29	22	54	0,53	<0,1

^aDonnées de Kabata_Pendias, 2001

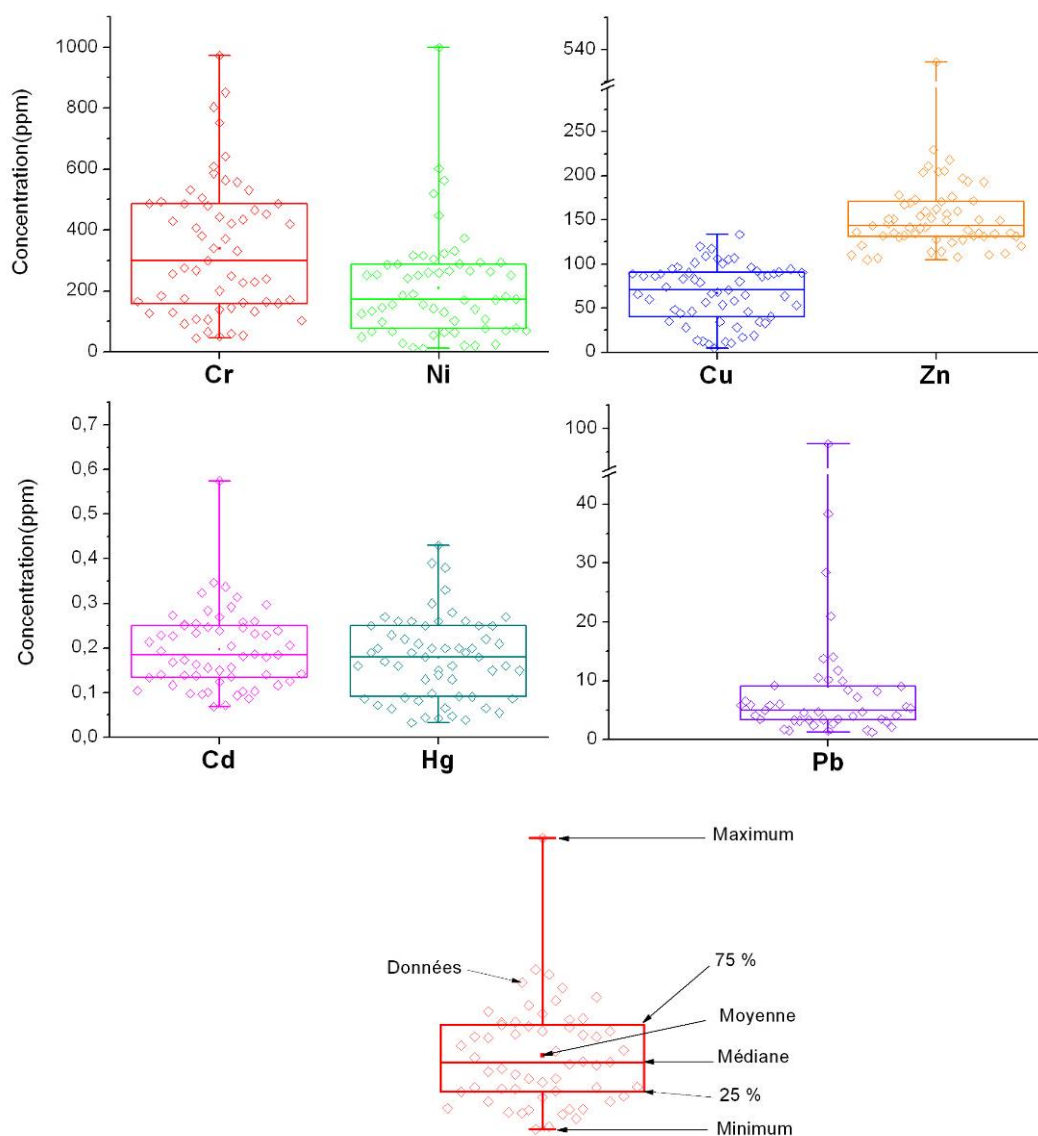


Figure 8 : Caractéristiques de la population totale des sols.

La gamme des valeurs des ETM est extrêmement large. Pour prendre en compte l'étendue des données, nous pouvons d'abord comparer les valeurs extrêmes. Prenons par exemple les teneurs du nickel, la valeur minimale est de 11 ppm et la valeur maximale est de 1000 ppm, le rapport entre valeur maximale et valeur minimale est donc de 90,9.

Nous constatons, grâce à la Figure 8, que la valeur extrême est une valeur « isolée » particulièrement élevée. La différence entre les quartiles supérieur et inférieur (3ème Quart – 1er Quart.), qu'on appelle l'écart interquartile, indique la dispersion d'un ensemble de données.

L'écart interquartile couvre 50 % d'un ensemble de données et élimine l'influence des valeurs aberrantes. Cet écart est élevé pour le Cr (326 ppm), le Ni (211 ppm) et plus faible pour le Cu (48,3 ppm), le Zn (39 ppm), le Pb (12,64 ppm) et le Cd (0,12).

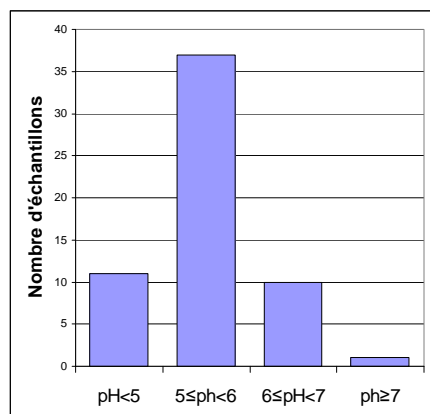
Des données moyennes des teneurs en ETM provenant de différents types de sols à l'échelle mondiale sont précisées dans le tableau (*Kabata-Pendias, 2001*). Nous constatons que les teneurs en Ni, Cr, Cu, Zn, mesurées sur les sols de la Réunion sont très largement au dessus de ces valeurs. Les teneurs en Hg sont légèrement plus fortes et les teneurs en Pb et Cd sont plus faibles que cette moyenne.

Les sols analysés ont un caractère acide, la moyenne est de 5,47 et 81 % des échantillons ont un pH inférieur à 6.

4.2 Aspect réglementaire

4.2.1 pH

Les textes réglementaires français qui concernent l'épandage des boues indiquent que « *les boues ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH avant épandage est inférieur à 6* », sauf dans le cas de boues chaulées où le pH doit être supérieur à 5. Ces dispositions découlent directement des propriétés physico-chimiques des ETM dont la solubilité augmente lorsque le pH du milieu diminue. La tolérance admise pour les boues chaulées est liée au caractère basique de la chaux qui tamponne le pH du sol.



Sur les 59 échantillons :

- 11 sont fortement acides avec un $\text{pH}_{\text{eau}} < 5$
- 37 sont acides avec un $5 \leq \text{pH}_{\text{eau}} < 6$
- 10 sont légèrement acides avec $6 \leq \text{pH}_{\text{eau}} < 7$
- 1 échantillon est neutre avec $\text{pH}_{\text{eau}} > 7$

Figure 9 : Distribution des échantillons de sol en fonction des gammes de pH_{eau}

Sur les 59 échantillons prélevés, 37 sols pourraient recevoir des boues chaulées et 11 des boues non chaulées. Pour les échantillons dont le pH est inférieur à 5, soit 19 % de nos parcelles échantillonnées, l'épandage est interdit.

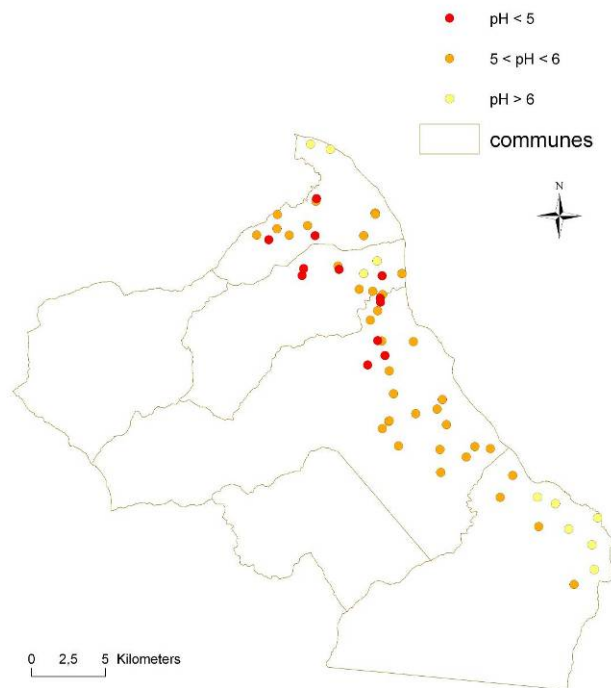


Figure 10 : Distributions des pH sur la zone d'étude

Les sols fortement acides sont localisés sur des sols issus des matériaux volcaniques du Piton des Neiges (Figure 10).

4.2.2 ETM

Nous avons comparé les concentrations mesurées pour la population totale des sols avec les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998. Ainsi, nous pouvons noter que 88 % des échantillons ont une teneur en Ni supérieure à 50 ppm, 78 % ont une teneur en Cr supérieure à 150 ppm, 15 % ont une teneur en Cu supérieure à 100 ppm et 2 % possèdent une teneur en Zn supérieure à 300 ppm (Tableau 5).

Tableau 5 : Comparaison des teneurs en ETM des sols échantillonnés avec les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998

	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Hg
Valeur limites (ppm) arrêté du 8 janvier 1998	100	300	100	50	150	2	1
Nombre d'échantillons supérieurs à la valeur limite	9	1	0	52	46	0	0
Pourcentage d'échantillons supérieurs à la valeur limite	15	2	0	88	78	0	0

Ainsi, pour la grande majorité des sols étudiés, en l'absence d'une dérogation, l'épandage des boues d'épuration n'est pas autorisé.

4.3 Origine des concentrations en ETM à la Réunion

Une étude réalisée sur les sols de la Réunion (Doelsch et al, 2006) a montré que l'origine des fortes concentrations en Cr, Cu, Ni et Zn est principalement due au fond pédogéochimique naturel.

Pour démontrer l'origine naturelle des sols, trois points ont été étudiés : (i) la distribution des ETM dans des profils de sol, (ii) la comparaison des teneurs en ETM pour des sols cultivés et non cultivés, (iii) les relations entre les teneurs en ETM du sol et l'origine de la roche mère (Doelsch et al., 2006c). Nous allons ici étudier uniquement l'influence de la roche mère sur les teneurs en ETM des sols, en comparant nos résultats avec les teneurs des sols mesurés en 2004, sur toute l'île de la Réunion.

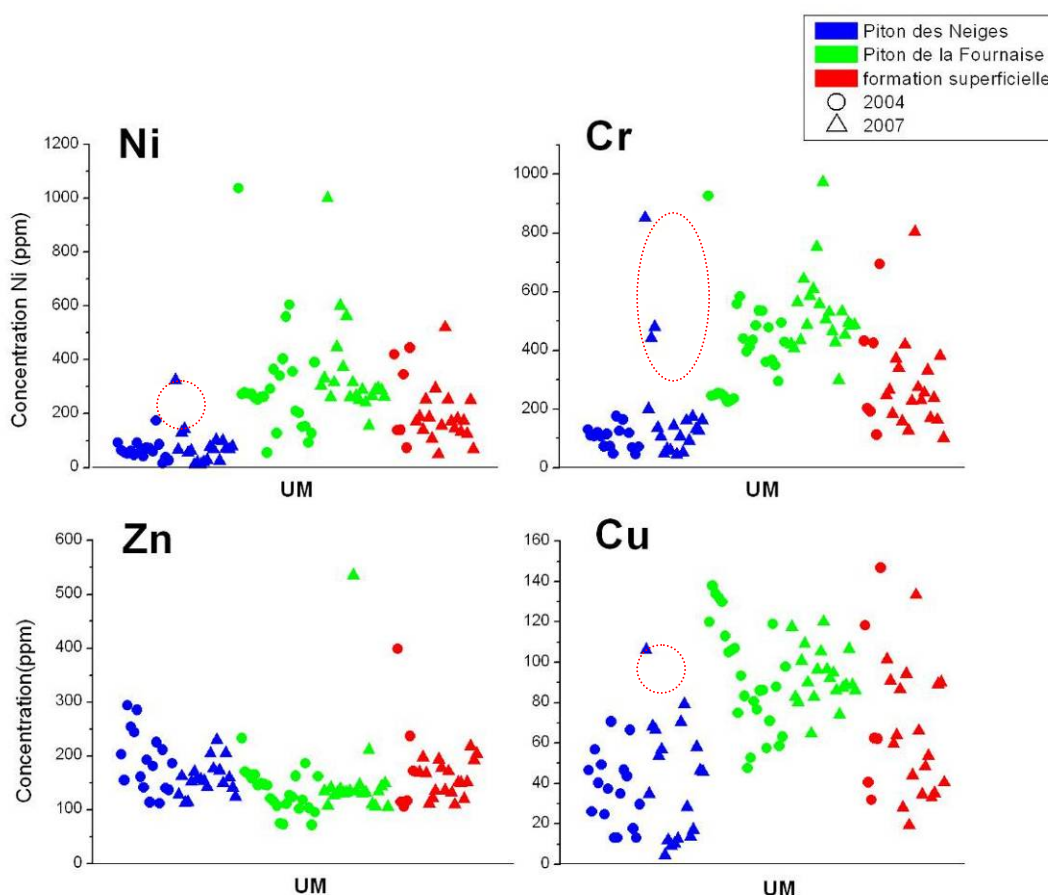


Figure 11 : Concentrations en Cr, Ni, Cu et Zn des sols, classés selon la nature du matériau parental (les UM sont classées par ordre croissant). Les résultats obtenus lors de l'inventaire de 2004 sont juxtaposés aux résultats de cette étude (2007).

Nous constatons que les gammes de concentrations des ETM mesurés dans les sols sont similaires pour les deux études. L'influence de la nature du matériau parental est la même pour les deux études.

La Figure 11 fait ressortir trois sous-populations qui sont caractérisées par des concentrations en Ni, Cr, Cu différentes :

- Les sols avec les concentrations en Cr, Cu, Ni les plus faibles correspondent aux sols développés sur des matériaux du Piton des Neiges.
- Les sols issus de matériaux du Piton de la Fournaise sont caractérisés par les teneurs en Cr, Cu et Ni les plus fortes.
- Les formations superficielles possèdent des concentrations intermédiaires par rapport aux deux sous-populations décrites précédemment.

Pour les concentrations en Zn, nous observons le comportement inverse, la médiane des concentrations est plus forte dans le Piton des Neiges que dans le Piton de la Fournaise. Les différences sont cependant moins importantes.

Les sols encerclés en rouge se distinguent de la tendance générale. Les sols appartiennent à l'unité de milieu 16, sols développés sur matériaux volcaniques issus du piton des neiges. Ils présentent des teneurs relativement fortes en Cr, Ni et Cu.

Les teneurs en ETM des sols semblent donc fortement influencées par la nature du matériau parental. Pour confirmer cette hypothèse, (Doelsch et al., 2006c) ont comparé les teneurs en ETM des sols aux teneurs des roches volcaniques sur lesquels les sols se sont formés.

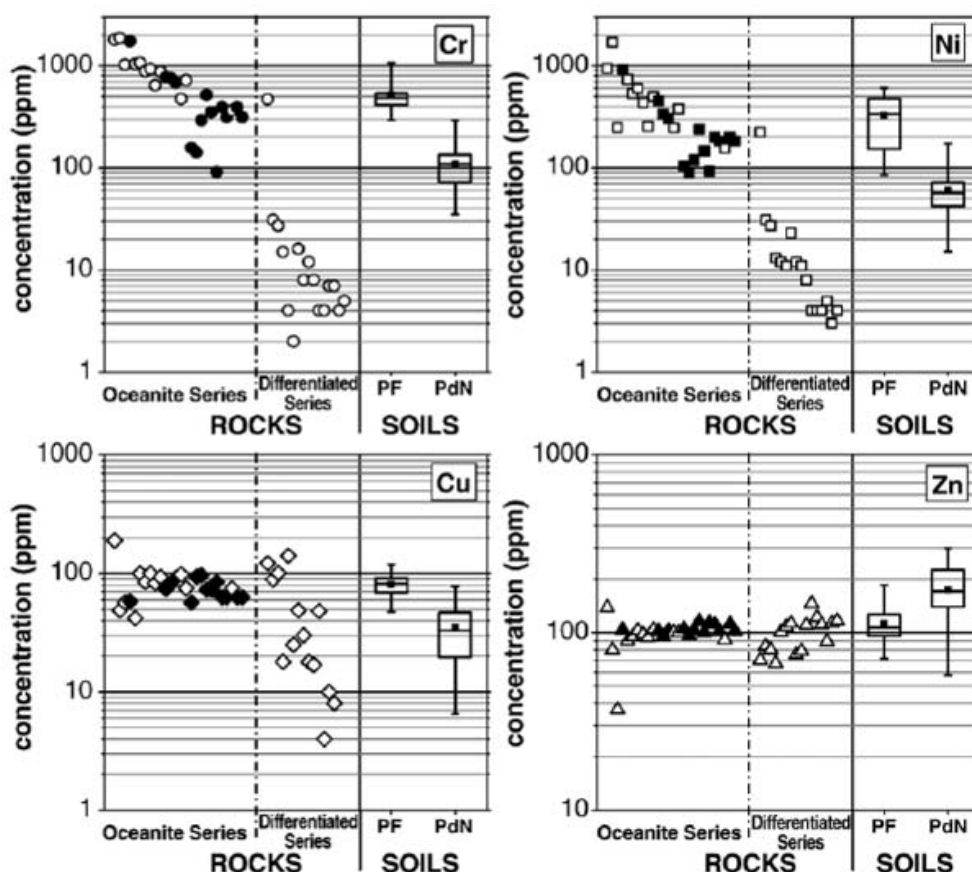


Figure 12 : Concentrations en ETM des laves issues de la série d'océanites (OS) (symbole blanc : Piton des Neiges, Symbole noir : Piton de la Fournaise) et des laves issues de la série différenciées (symbole blanc : Piton des Neiges) sur la partie gauche du graphe. Les concentrations en ETM des sols mesurés sur des sols issus des matériaux volcaniques du Piton de la Fournaise (PF) et du Piton des Neiges (PdN) sont représentées sur la partie droite du graphique. (Doelsch et al., 2006c)

Les laves les plus anciennes issues du piton des Neiges (>2.1 – 0.43 MA) sont référencées comme « série d'océanites » (OS : océanite series), le stade suivant (43 -10/20 kA) est caractérisé par la mise en place de série de laves différenciées (DS : differentiated series). L'évolution de la série OS à DS entraîne une modification de la composition chimique du magma. Les laves issues du Piton de la Fournaise sont principalement des laves de types OS.

Sur la Figure 12, les concentrations en Cr, Cu, Ni, Zn des laves issues du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise sont comparées aux concentrations des sols se développant sur ces deux massifs. Cette comparaison nous montre que (i) les fortes concentrations du sol en Cr, Cu, Ni formé sur le Piton de la Fournaise sont comparables aux concentrations mesurées dans les laves issues de la série d'océanites (OS) du Piton de la Fournaise, et (ii) la gamme des concentrations en Cr, Cu, Ni des sols développés sur le Piton des Neiges est corrélée avec les concentrations en Cr, Cu, Ni des laves du Piton des Neiges DS. Nous observons également une corrélation entre les concentrations en Zn du sol et des roches mères.

Ces observations permettent de confirmer, l'origine naturelle des fortes teneurs en ETM (Cr, Ni, Cu, Zn) mesurées dans les sols. Ces ETM présents dans les sols sont principalement issus de l'héritage des roches mères altérées et les concentrations élevées correspondent au fond pédogéochimique naturel.

4.4 Sur quels éléments traces métalliques porte la dérogation ?

Pour préserver le sol d'une éventuelle pollution, il est nécessaire de conserver des valeurs seuils pour certains métaux. Nous allons donc regarder si les échantillons qui dépassent les valeurs limites (Cr, Ni, Cu, Zn) ont une origine naturelle ou s'ils sont issus d'une pollution anthropique.

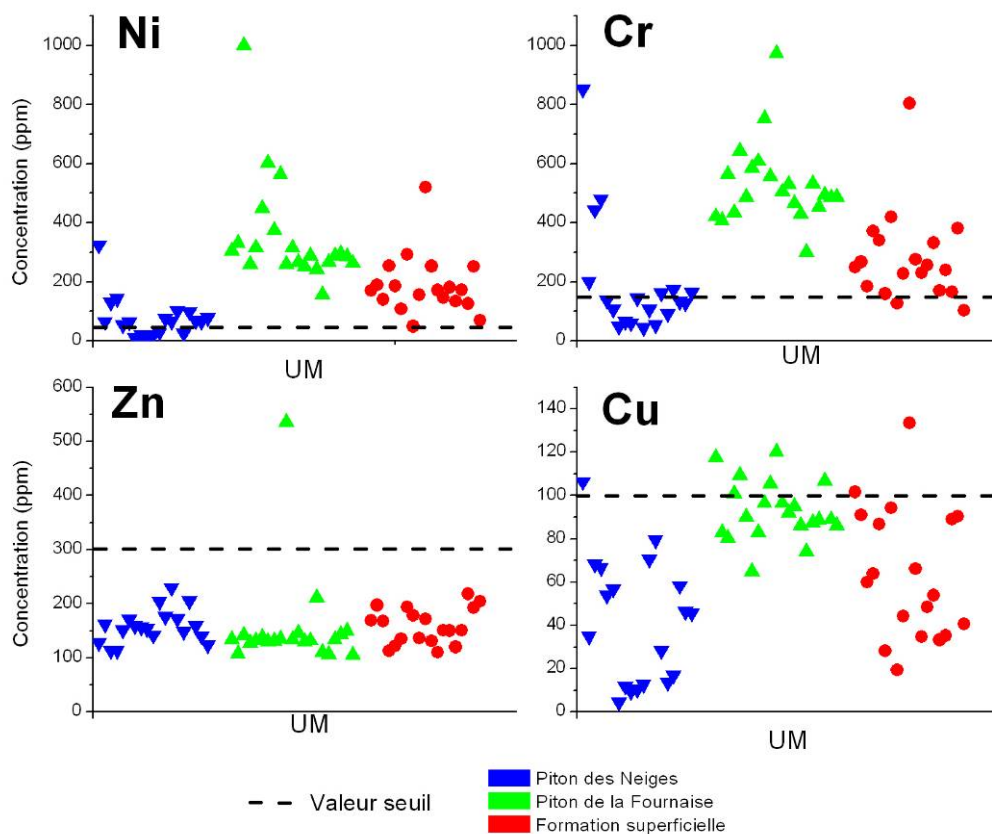


Figure 13 : Concentrations en Cr, Ni, Cu et Zn des sols, classés selon la nature du matériau parental (les UM sont classées par ordre croissant). Les valeurs seuils de l'arrêté du 8 janvier 1998 sont indiquées pour chaque ETM par une ligne en pointillé.

4.4.1 Les valeurs seuils du Ni, Cr et Cu

Nous avons montré que les fortes teneurs en Ni, Cr et Cu mesurées dans les sols sont principalement issues de l'héritage des roches mères altérées (Figure 11 et Figure 12). Les valeurs seuils du Ni, Cr, Cu ne sont pas adaptées au sol de la Réunion car elles se situent dans les gammes des concentrations « naturelles » (Figure 13), proches de celles mesurées dans les roches mères.

Les dépassements en Ni, Cr et Cu de la valeur seuil de l'arrêté du 8 janvier 1998 ne traduisent pas une pollution anthropique.

4.4.2 La valeur seuil du Zn

Nous constatons, sur les Figure 11 et 13, que la gamme des teneurs mesurées sur les sols issus du Piton des Neiges est plus forte que celle mesurée sur les sols issus du Piton de la Fournaise. Cependant, même sur les sols du Piton des Neiges, ces teneurs sont inférieures aux valeurs seuils. Un seul échantillon est supérieur à la valeur seuil.

En étudiant avec plus de précisions les caractéristiques de ce sol, nous constatons de fortes teneurs pour plusieurs ETM. Le plomb par exemple, dont la moyenne est à $9,07 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans les 59 sols échantillonnés, a une teneur de 93 mg.kg^{-1} dans ce sol, valeur proche du seuil réglementaire (100 mg.kg^{-1}). On retrouve aussi $0,38 \text{ mg.kg}^{-1}$ de mercure, pour une moyenne de $0,18 \text{ mg.kg}^{-1}$. C'est un sol qui a subi un apport anormal d'éléments traces métalliques caractéristique d'une pollution anthropique.

Les teneurs en Zn dans les sols sont influencées par la nature de la roche mère, cependant les concentrations mesurées dans les sols restent inférieures à la limite réglementaire fixée. Le seul échantillon de sol dépassant cette valeur seuil présente une pollution anthropique.

La dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues d'épuration ne doit pas porter sur les teneurs en zinc dans les sols.

Les sols échantillonnés sont acides (98 % des sols ont un $pH < 7$). L'épandage serait interdit ($pH < 5$) sur 19 % des parcelles échantillonnées, et les boues seraient nécessairement chaulées avant épandage pour 63 % des parcelles ($5 \leq pH \leq 6$).

Les fortes teneurs en Cr, Ni, Cu mesurées dans les sols sont d'origine naturelle. Ces ETM présents dans les sols sont principalement issus de l'héritage des roches mères altérées et les concentrations élevées correspondent au fond pédogéochimique naturel. Les valeurs seuils imposées par l'arrêté du 8 janvier 1998, qui régit l'épandage agricole des boues d'origine urbaine, ne sont pas adaptées aux concentrations naturelles en Ni, Cr et Cu des sols de la Réunion.

Si les concentrations en Zn sont également élevées, elles demeurent inférieures à la valeur seuil réglementaire (le seul dépassement observé correspond à un site contaminé).

Ainsi, la demande de dérogation ne devra porter que sur le chrome, le nickel et le cuivre.

5. LA MOBILITE DES ETM

La dérogation serait demandée pour le chrome, le nickel et le cuivre, nous allons donc étudier leur mobilité dans les sols. La mobilité est estimée par une méthode expérimentale de lixiviation. Nous allons dans les paragraphes suivants expliciter la notion de mobilité et étudier les résultats obtenus.

5.1 Le concept de mobilité

Dans le sol, les éléments traces métalliques sont distribués entre la phase solide et la phase liquide (solution du sol) qui le constituent. Le plus souvent, la quantité se trouvant dans la solution du sol (concentrations de l'ordre de 10^{-8} M à 10^{-4} M) ne représente qu'un infime pourcentage de la totalité de l'élément présent dans le sol. Les métaux se concentrent donc dans la fraction solide du sol, où ils se répartissent entre les différentes fractions organiques et minérales (Figure 14).

La **mobilité** d'un élément est son aptitude à passer dans les compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu, le compartiment ultime étant représenté par la phase liquide. Les changements de compartiment se font en permanence à des vitesses variables et sont dépendants des conditions du milieu (variation du pH, aération, température, conditions d'oxydoréduction, environnement chimique, hydratation...). Les variations du milieu, induites par l'homme ou naturelles, modifient en permanence la distribution des ETM entre les phases constitutives du sol.

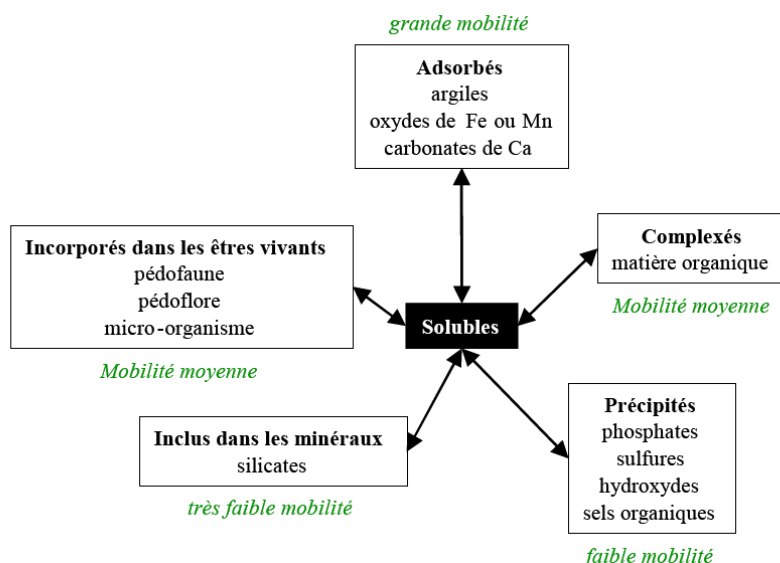


Figure 14 : Répartition des éléments traces métalliques dans le sol

5.2 Essai de lixiviation

5.2.1 Résultats et discussion

Le Tableau 6 présente de manière synthétique les teneurs en Cr, Cu, Ni mesurés dans les éluats obtenus des 59 échantillons. De nombreux échantillons pour Cr et Cu sont caractérisés par des concentrations inférieures à la limite de détection analytique. Nous avons supprimé ces valeurs de l'analyse statistique, ce qui explique que le nombre d'observations (N Actifs) soit inférieur à 59.

Les concentrations mesurées dans les blancs sont inférieures à la limite de détection analytique ce qui signifie qu'il n'y a pas eu de contaminations des échantillons (données non présentées). La reproductibilité des lixiviations est bonne puisque le coefficient de variation (rapport entre l'écart type et la moyenne) est inférieur à 10%.

Cet essai nous permet de comparer les valeurs de mobilité mesurées dans nos sols aux valeurs de références précisées dans le guide technique « dérogation ETM ». Le dépassement de ces « seuils d'investigation » traduit une mobilité trop importante des ETM et ferme a priori la porte à une dérogation.

Tableau 6 : Teneurs mesurées dans les éluats de l'essai de lixiviation

	Cr	Cu	Ni
N Actifs	5	8	53
Moyenne ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	0,51	1,89	5,62
Médiane ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	0,43	1,79	4,41
Seuil d'investigation ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	2	20	20
Nbre valeurs > seuil	0	0	1

Plusieurs observations peuvent être faites :

- Les teneurs mesurées pour évaluer la mobilité du Cr et du Cu sont faibles, aucun échantillon ne présente une mobilité supérieure aux seuils d'investigation.
- seulement 1 échantillon présente une mobilité du Ni supérieure à la valeur de référence.

5.2.2 Etude du cas particulier

L'échantillon n°1 présente des teneurs en nickel « mobile » supérieures à la valeur d'investigation donnée dans le guide technique « Dérogation ETM ». Cet échantillon est situé sur l'unité de milieu 50, un andosol chromique sur cendres associées à de nombreux gratons, sur matériaux issus du Piton de la Fournaise.

Nous pouvons comparer cet échantillon aux 8 autres échantillons prélevés sur le même type (UM 50) de sol (Tableau 7, Figure 15).

Tableau 7 : Comparaison des teneurs totales en ETM (en ppm) de l'échantillon 1, et des échantillons de sol appartenant à l'UM 50

	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Hg
Ech. 1	118	134	< 1.0	304	421	0,24	0,16
Moyenne des éch. UM 50	88,5	131	4,69	487	561	0,26	0,12
Moyenne des 59 échantillons	67	157	9,07	210	339	0,20	0,18

Les teneurs totales de cet échantillon ne sont pas particulièrement levées, elles se situent dans la moyenne des teneurs mesurées sur l'UM 50. Cet échantillon a une teneur en Ni_{mobile} de $25 \mu g.L^{-1}$, il dépasse donc la valeur seuil d'investigation qui est de $20 \mu g.L^{-1}$. La moyenne des 8 autres échantillons sur UM 50 est de $5,57 \mu g.L^{-1}$.

Si nous calculons la mobilité moyenne des sols appartenant l'UM 50, y compris l'échantillon 1, la moyenne est de $7 \mu g.L^{-1}$, elle reste inférieure au seuil d'investigation.

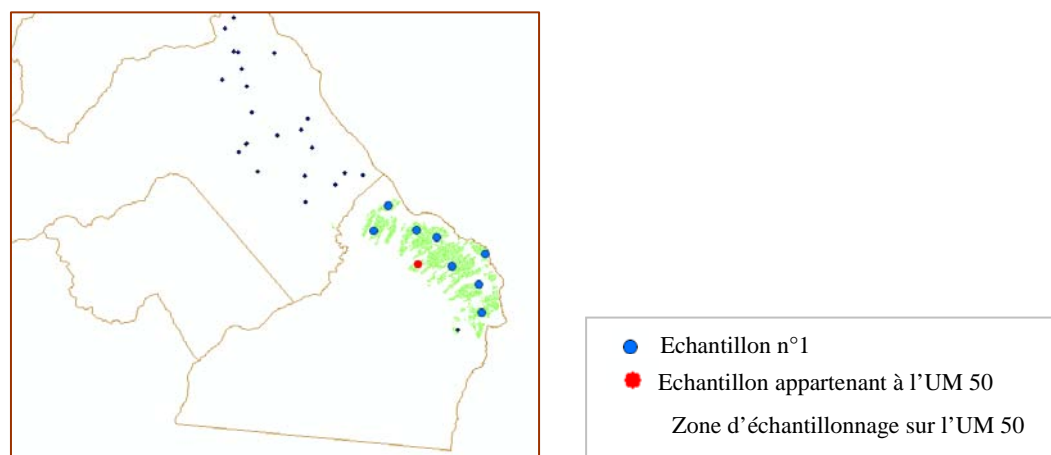


Figure 15 : Localisation de l'échantillon n°1, commune de Sainte Rose

Le nickel de ce sol présente une mobilité légèrement plus forte que les valeurs seuils d'investigation, et plus fortes que les sols appartenant à la même unité de milieu. Les teneurs en ETM totales ne sont pas particulièrement élevées pour ce type de sol. Ce sol ne présente pas de signes d'une pollution d'origine anthropique. Nous pouvons considérer que c'est une « anomalie » géochimique très localisée.

Les quantités de Cr, Cu, et Ni extraites par lixiviation sont inférieures aux seuils d'investigation présentés dans le guide technique « Dérogations ETM ». Un seul échantillon sur les 59 dépasse le seuil d'investigation pour le nickel, ce dépassement est faible, local et non représentatif de ce type de sol.

La mobilité du chrome, du nickel et du cuivre est faible, ce qui permet de passer à l'étape suivante d'évaluation de la phytodisponibilité des ETM.

6. LA PHYTODISPONIBILITE DES ETM

En poursuivant dans la logique de la demande de dérogation, nous allons étudier dans les paragraphes suivant, la phytodisponibilité du Cr, du Ni et du Cu. Nous avons effectué deux approches complémentaires pour estimer la phytodisponibilité : tout d'abord par extraction chimique sur les sols, puis par analyse des végétaux cultivés sur les parcelles échantillonnées.

6.1 Le concept de biodisponibilité

La biodisponibilité d'un élément est son aptitude à être transféré d'un compartiment quelconque du sol dans un organisme vivant. La phytodisponibilité représente la quantité d'ETM qui peut être transférée dans la plante durant son développement.

Selon Baize (1997), la phytodisponibilité est un potentiel résultant de l'interaction de trois séries de facteurs :

- espèces chimiques présentes dans la solution du sol (nature et concentration),
- espèce et variété de l'organisme vivant considéré (génome),
- propriétés physico-chimiques et microbiologiques du sol.

Une fois entré dans la plante, l'élément (ou l'espèce chimique) est soit stocké dans les racines, soit redistribué dans d'autres organes (tiges, feuilles, grain) en fonction d'une "stratégie" propre à chaque plante, en fonction du caractère utile (nutritif) ou toxique de l'élément.

6.2 Extraction chimique

Nous avons réalisé l'extraction chimique au nitrate d'ammonium sur les 59 échantillons (Cf § 3.2.1.4). Le Tableau 8 présente de manière synthétique les teneurs en ETM mesurées dans les filtrats obtenus des 59 échantillons.

Les concentrations mesurées dans les blancs sont inférieures à la limite de détection analytique, excepté pour le zinc pour lequel la moyenne des concentrations des blancs est de $0,01\text{mg.kg}^{-1}$. Il n'y a donc pas eu de contaminations pendant les manipulations. La reproductibilité des extractions est généralement bonne puisque le coefficient de variation (rapport entre l'écart type et la moyenne) est inférieur à 20% pour la majorité des échantillons.

Nous avons reporté dans le Tableau 8 les seuils provisoires d'investigation proposés dans le guide technique « Dérogation ETM » pour évaluer la phytodisponibilité des ETM.

Tableau 8 : Teneurs mesurées dans les éluats de l'essai d'extraction chimique au nitrate d'ammonium

	Cr	Cu	Ni
N Actifs	49	53	59
Moyenne (mg.kg ⁻¹)	0,004	0,02	0,14
Médiane (mg.kg ⁻¹)	0,003	0,01	0,11
Seuil d'investigation (mg.kg ⁻¹)	-	1	1,5
Nbre valeurs > seuils	0	0	0

Les teneurs mesurées en Cr, Cu, Ni sont toutes inférieures au seuil d'investigation provisoire indiqué par le guide « Dérogation ETM ».

Les quantités de Cr, Cu et Ni extraites du sol par l'extraction chimique sont faibles et inférieures aux seuils d'investigation proposés par le guide technique Dérogation boues ETM.

D'après cette expérimentation, la phytodisponibilité du Cr, Cu et Ni est faible.

6.3 Analyse des cannes à sucre cultivées au champ

6.3.1 Résultats

Afin de vérifier et compléter l'approche par extraction, nous avons également mesuré les ETM dans les cannes à sucre. En effet, la plante représente le réactif d'extraction qui traduit le mieux la biodisponibilité réelle, car elle intègre tous les facteurs liés aux sols et à l'élément. (Juste, 1988)

Le Tableau 9 présente de manière synthétique les caractéristiques des variables analytiques des 50 échantillons de cannes à sucre à l'aide des paramètres suivants : minimum, médiane, moyenne, maximum. Cette présentation est complétée par la Figure 16 qui reprend ces paramètres sous la forme de « boîtes à moustaches » sur lesquelles sont surimposées l'ensemble des données numériques.

Tableau 9: Caractéristiques de la population totale de bagasses et de jus des cannes à sucre.

		MS %	Cr (mg.kg ⁻¹ MS)	Cu (mg.kg ⁻¹ MS)	Ni (mg.kg ⁻¹ MS)
Bagasse	min	47,5	0,2	1,1	0,1
	moyenne	52,3	0,5	2,2	1,5
	médiane	52,0	0,4	2,3	1,1
	max	58,1	1,1	3,0	5,3
Jus	min	11,2	0,2	0,6	0,3
	moyenne	14,9	0,4	2,1	0,9
	médiane	14,9	0,3	1,9	0,7
	max	17,5	0,9	5,1	3,7

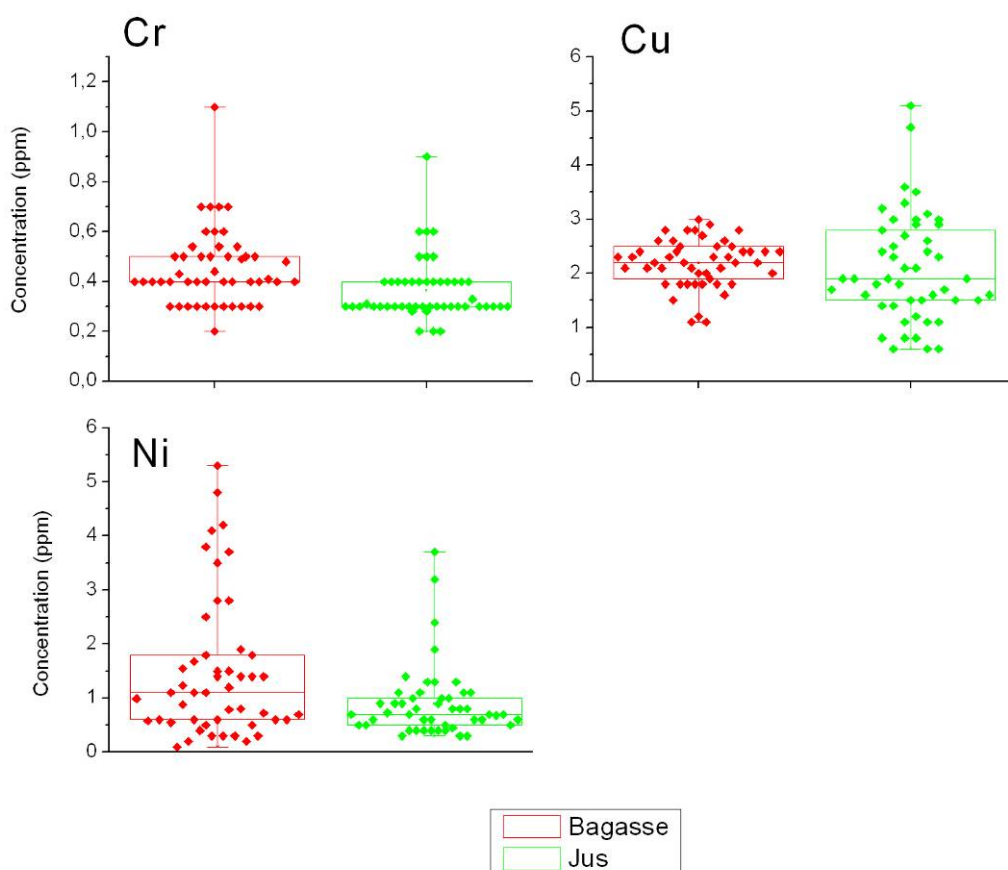


Figure 16 : Caractéristiques de la population totale du Cr, Ni, Cu dans la bagasse et le jus des cannes à sucre

Le Tableau 9 et La Figure 16 permettent de montrer que :

- Les teneurs en Cr, Ni, Cu sont plus concentrées dans la bagasse que dans le jus
- Le Cu est l'élément le plus concentré avec une gamme comprise entre 0.6 et 5.1 mg.kg⁻¹ de MS.
- Le Cr est l'ETM le moins concentré, avec une gamme comprise entre 0.2 et 1.1 mg.kg⁻¹ de MS.

6.3.2 Discussion

Il n'existe pas de valeurs de références ou de seuils qui nous permettent de savoir si les concentrations en ETM mesurées dans la canne à sucre sont anormalement élevées ou non.

Pour analyser ces résultats nous allons :

- Comparer nos résultats avec des références bibliographiques.
- Comparer les concentrations en ETM des cannes à sucre cultivées sur des sols particulièrement riches en ETM (sols issus du Piton de la Fournaise) à des cannes à sucre développées sur des sols dont les concentrations sont inférieures (sols issus du Piton des Neiges).

6.3.2.1 Etudes bibliographiques

Les références bibliographiques concernant la phytodisponibilité des ETM dans la canne à sucre sont peu nombreuses. Nous avons recensé toutes les publications qui mesurent les ETM dans la canne à sucre afin d'obtenir des gammes de valeurs pour chaque ETM. Nous comptabilisons 5 publications qui étudient le Cr et le Ni, et 10 publications pour le Cu.

Le Cr et le Ni sont des métaux toxiques pour les plantes lorsque les teneurs absorbées sont fortes. Le cuivre est un élément nécessaire au développement de la plante, mais qui devient toxique pour des concentrations élevées. Dans leur ouvrage consacré aux ETM dans les sols et les plantes, Kabata-Pendias, (2001) ont compilé les données scientifiques des teneurs en ETM dans les feuilles matures de différents végétaux.

Tableau 10 : Concentration de feuilles matures d'espèces variées

	<i>Déficiencia</i>	<i>Normale</i>	<i>Excessive ou toxique</i>
Cr	-	0,1-0,5	5-30
Cu	2-5	5-30	20-100
Ni	-	0,1-5	10-100

Le Tableau 10 nous permet de situer nos résultats dans des domaines de concentrations correspondants à des concentrations de carence, normales ou excessives. Les moyennes de concentrations mesurées dans la bagasse en Cr (0.5 ppm), en Cu (2.2 ppm), et en Ni (1.5 ppm) sont dans un domaine de concentration « normal ». Il faut cependant garder à l'esprit que ces gammes de concentrations ont été mesurées dans des feuilles.

Sur la Figure 17, nous avons regroupé toutes les valeurs publiées en précisant l'organe mesuré (racine, tige, feuille...). Sur cette figure, nous avons juxtaposé les teneurs mesurées à la Réunion en 2004 (inventaire ETM, E. Doelsch) et en 2007.

À partir de la recherche bibliographique et de la Figure 17, nous pouvons faire les commentaires suivants :

- Les gammes des valeurs publiées sont très larges, par exemple le Cu mesuré dans les feuilles de canne à sucre varie de 0.08 à 95 ppm.
- Peu de données sont disponibles pour le Cr et le Ni
- Les teneurs mesurées sur l'île de la Réunion sont dans les mêmes gammes de valeurs que celle rencontrées dans les autres études. Les teneurs mesurées dans les jus sont plus fortes que les teneurs publiées. Les teneurs mesurées dans la bagasse sont inférieures aux teneurs publiées dans les tiges pour le Cr et Ni et équivalentes pour le Cu.

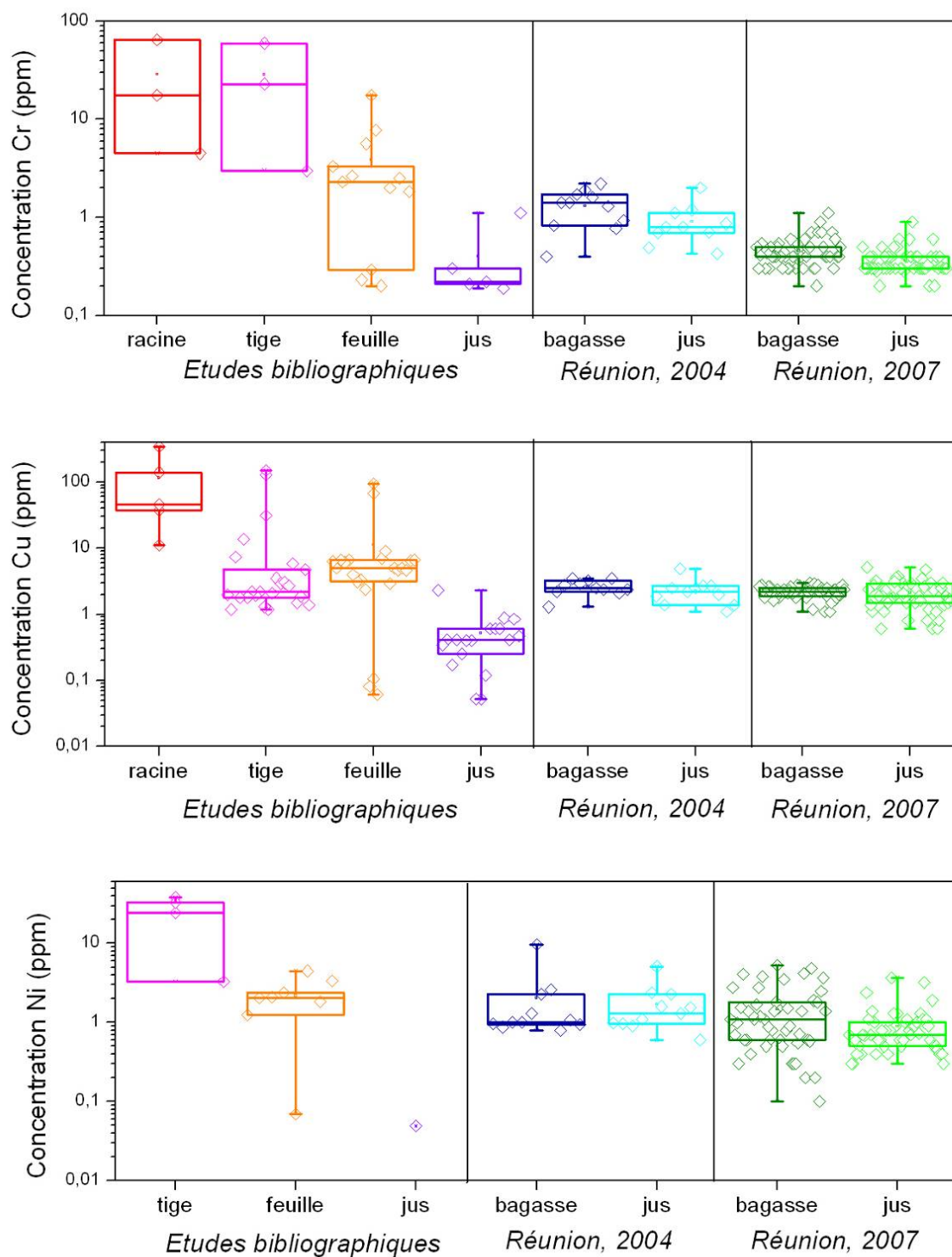


Figure 17: Répartition des teneurs en ETM publiées dans la littérature et des teneurs mesurées sur l'île de la Réunion en 2004 et en 2007. ((Barzegar et al., 2005; Bertoncini et al., 2004; Cunha-Campos and Curtius, 1982; Li et al., 2007; Liu et al., 1994; Mohamed, 1999; Muchuweti et al., 2006; Oliveira and Mattiazzo, 2001; Oliveira et al., 2002; Rayment et al., 2002; Segura-Munoz et al., 2006))

6.3.2.2 Comparaison des cannes à sucre « Piton des Neiges » et « Piton de la Fournaise »

L'intérêt majeur de notre zone d'étude est de pouvoir échantillonner des cannes à sucre qui se développent sur des sols riches en ETM (sols issus des matériaux volcaniques du Piton de la Fournaise) et des sols moins riches (sols issus des matériaux volcaniques du Piton des Neiges).

Nous allons former deux sous populations de cannes à sucre, en fonction du type de sols. Les cannes à sucres échantillonnées sur :

- les sols ayant des teneurs totales en ETM inférieures à la valeur seuil (arrêté 8 janvier 1998)
- les sols ayant des teneurs totales en ETM supérieures à la valeur seuil.

Nous avons reporté, dans le Tableau 11, les moyennes des teneurs mesurées dans la bagasse et dans le jus des deux sous populations de canne à sucre. Pour les trois éléments, les moyennes des concentrations des cannes à sucre des deux populations sont similaires (statistiquement non différentes). La Figure 18 illustre la répartition des concentrations, les concentrations des cannes à sucres qui se développent sur des sols riches (diagramme de droite, en vert) ne sont pas supérieures aux cannes qui se développent sur des sols moins riches (diagramme de gauche, en rouge).

Tableau 11 : Teneurs en Cr, Cu, Ni dans la bagasse et le jus de canne à sucre dans deux sous populations : les cannes à sucre se développant sur des sols ayant une teneur totale en ETM inférieure à la valeur seuil de l'arrêté du 8 janvier 1998, et des sols ayant une teneur totale supérieure au seuil.

	Cr		Cu		Ni	
Teneur totale dans le sol (ppm)	Cr _{sol} <150	Cr _{sol} >150	Cu _{sol} <100	Cu _{sol} >100	Ni _{sol} < 50	Ni _{sol} > 50
Nbre éch. de canne à sucre	11	39	44	6	6	44
Concentration moyenne bagasse (ppm)	0,43	0,47	2,16	2,27	2,0	1,4
Concentration moyenne jus (ppm)	0,35	0,37	2,07	2,03	1,0	0,8

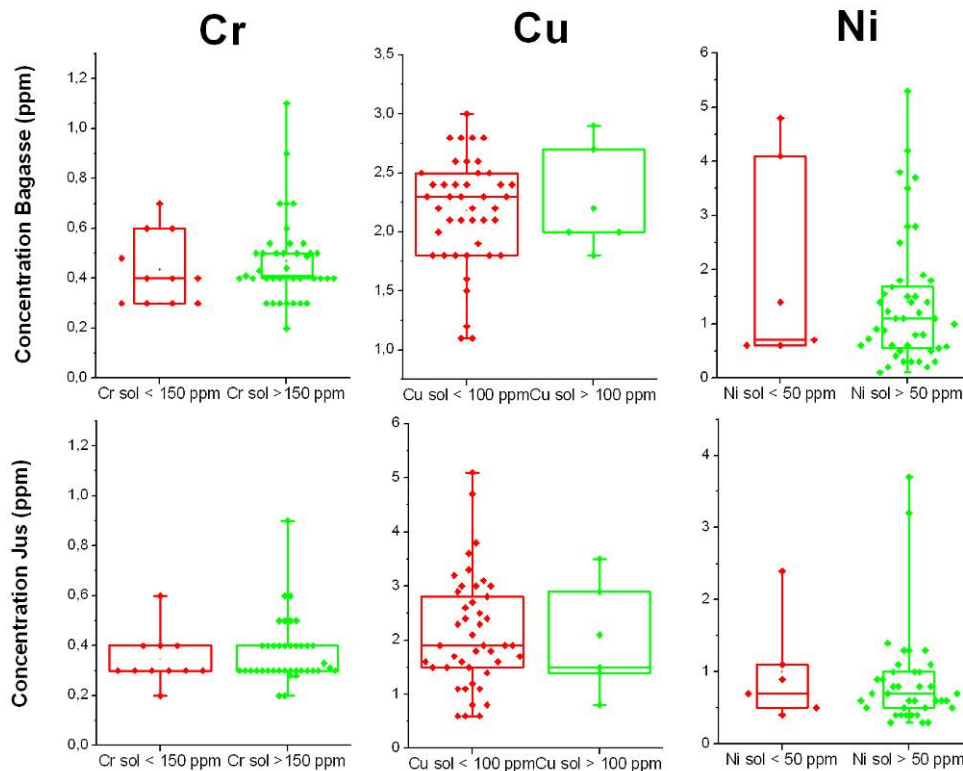


Figure 18 : Teneurs en Cr, Cu, Ni dans la bagasse et le jus de cannes à sucre dans deux sous populations : les cannes à sucre se développant sur des sols ayant une teneur totale en ETM inférieure à la valeur seuil (à gauche en rouge), et des sols ayant une teneur totale supérieure au seuil (à droite en vert)

La canne à sucre n'absorbe donc pas les ETM de façon proportionnelle aux teneurs totales mesurées dans le sol. Cette comparaison, grâce à des mesures in-situ de la canne à sucre, nous montre d'une manière simple et concrète la non-phytodisponibilité des éléments dans les sols.

L'étude bibliographique effectuée sur la canne à sucre, nous permet d'observer que les teneurs mesurées dans les tiges des cannes à sucre (bagasse et jus) sont comprises dans la gamme des valeurs publiées.

Les cannes à sucre qui se développent sur des sols riches en ETM n'absorbent pas plus d'ETM que les cannes à sucre qui se développent sur sols moins riches.

Ces observations basées sur les analyses des végétaux en champs viennent confirmer les résultats de l'expérimentation effectuée pour évaluer la phytodisponibilité. Nous pouvons donc conclure que les éléments traces métalliques présents dans les sols de la Réunion, sont peu phytodisponibles.

7. CONCLUSION

Afin d'éviter la contamination du milieu, l'arrêté du 8 janvier 1998 concernant l'épandage agricole des boues urbaines prévoit des valeurs seuils pour les éléments traces métalliques dans les sols soumis à épandage. Néanmoins, la législation prévoit que des dérogations aux valeurs seuils puissent être accordées par le préfet sur la base d'études du milieu concerné montrant que les ETM des sols sont ni mobiles ni biodisponibles. Pour réaliser cette étude, nous avons suivi les démarches explicitées dans le guide technique publié par l'ADEME et l'APCA: « Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration - Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ».

L'étude a été réalisée sur des sols agricoles des communes de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST). Nous avons échantillonné 59 sols sur des parcelles de canne à sucre où l'épandage des boues d'épuration pourrait être envisagé, en respectant la réglementation en vigueur (distances de sécurité autour des cours d'eau, pente, etc.).

Ces **sols sont acides** (98 % des sols ont un $\text{pH} < 7$). D'après l'arrêté du 8 janvier 1998, l'épandage serait interdit sur 19 % des parcelles échantillonnées ($\text{pH} < 5$), et les boues serait nécessairement chaulées avant épandage pour 63 % des parcelles ($5 \leq \text{pH} \leq 6$).

Les sols sont particulièrement **riches en Cr, Cu, Ni et Zn** empêchant, selon la réglementation en vigueur, l'épandage agricole des boues de stations d'épuration. En effet, 88 % des sols étudiés présentent des teneurs en Ni supérieures à la valeur seuil fixée par l'arrêté du 8 janvier 1998 et 58 % des sols étudiés pour Cr.

Nous avons montré que les concentrations en ETM des sols sont corrélées avec les compositions des roches mères. Les sols développés sur du matériel issu du Piton de la Fournaise sont plus riches en Cr, Cu et Ni que ceux développés à partir de matériel issu du Piton de Neiges. Ainsi, les **fortes concentrations en Cr, Ni et Cu** des sols étudiés **ont une origine naturelle**. Seul 1 sol présente une concentration en Zn supérieure à la valeur seuil réglementaire. Plusieurs éléments permettent de penser qu'il s'agit d'un sol contaminé par une activité anthropique. Autrement dit, **la demande de dérogation ne peut pas porter sur Zn**.

Pour étudier la mobilité et la phytodisponibilité, nous avons réalisé deux expérimentations en laboratoire en respectant des méthodes de référence (norme ISO).

Les quantités de Cr, Cu, et Ni extraites par l'essai de lixiviation sont inférieures aux seuils d'investigation présentés dans le guide technique « Dérogations ETM ». Un seul échantillon sur les 59 dépasse le seuil d'investigation pour le nickel, ce dépassement est faible, local et non représentatif du type de sol. La **mobilité de Cr, Ni et Cu est donc faible**.

Les quantités de Cr, Cu et Ni extraites du sol par l'extraction chimique sont faibles et inférieures aux seuils d'investigation proposés par le guide technique « Dérogation ETM ». Ainsi, la phytodisponibilité de Cr, Cu et Ni est faible.

Les analyses des cannes à sucre viennent confirmer les résultats de l'expérimentation en laboratoire. L'étude bibliographique effectuée sur la canne à sucre, nous permet d'observer que les teneurs mesurées dans les tiges des cannes à sucre (bagasse et jus) sont comprises dans la gamme des valeurs publiées. La comparaison des teneurs en Cr, Cu, Ni des cannes qui sont prélevées sur des sols riches en ETM et sur des sols moins riches nous permet de confirmer la non phytodisponibilité de ces ETM. En effet, les cannes à sucre qui se développent sur des sols riches en ETM n'absorbent pas plus d'ETM que les cannes à sucre qui se développent sur des sols moins riches.

Nous pouvons donc conclure, grâce à ces deux approches complémentaires, que le **Cr, Cu et Ni présents dans les sols de la Réunion sont peu phytodisponibles.**

Nous avons étudié et vérifié dans cette étude les trois conditions nécessaires pour obtenir une dérogation aux valeurs seuil du chrome, du nickel et du cuivre :

- L'origine naturelle de ces éléments dans les sols ;
- Cr, Cu et Ni sont peu mobiles ;
- Cr, Cu et Ni sont peu phytodisponibles.

Ainsi, d'un point de vue scientifique, une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration serait recevable.

En outre, la diversité des sols étudiés au cours de ce travail, sols développés à la fois sur les flancs du Piton de la Fournaise et du Piton des Neiges, permet d'envisager que **la demande de dérogation porte sur l'ensemble de l'île de La Réunion.**

8. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, A., 2005. Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques? Guide technique.
- Barzegar, A.R., Ahmad, K., Xing, B.S. and Herbert, S.J., 2005. Concentration changes of Cd, Ni and Zn in sugarcane cultivated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 161(1/4): 97-112.
- Bertoncini, E.I., Mattiazzi, M.E. and Rossetto, R., 2004. Sugarcane Yield and Heavy Metal Availability in Two Biosolid-Amended Oxisols. *Journal of Plant Nutrition*, 27(7): 1243-1260.
- Cunha-Campos, C. and Curtius, A.J., 1982. Distribuicao de Metais em Cana-de-Acucar.; The distribution of metals in sugarcane. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 54(4): 663-668.
- Doelsch, E., 2003. Eléments traces métalliques - Etat des lieux et des connaissances pour l'île de La Réunion (roches, sols, végétaux et déchets), CIRAD.
- Doelsch, E., 2004. Eléments traces métalliques - Inventaire pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux), CIRAD-MVAD.
- Doelsch, E., Deroche, B. and Van de Kerchove, V., 2006a. Impact of sewage sludge spreading on heavy metal speciation in tropical soils (Reunion, Indian Ocean). *Chemosphere*, 65(2): 286-293.
- Doelsch, E., Saint Macary, H. and Van de Kerchove, V., 2006b. Sources of very high heavy metal content in soils of volcanic island (La Reunion). *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3): 194-197.
- Doelsch, E., Van de Kerchove, V. and Saint Macary, H., 2006c. Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean). *Geoderma*, 134(1-2): 119-134.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Fla., 413 pp.
- Li, M.S., Luo, Y.P. and Su, Z.Y., 2007. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution*, 147(1): 168-175.
- Liu, W., Tzeng, J., Li, S., Wang, M. and Wang, Y., 1994. Metal pollutants in landfill soils and their effect on sugarcane. *Environmental Geochemistry and Health*(Special issue): 115-129.
- Mohamed, A.E., 1999. Environmental variations of trace element concentrations in Egyptian cane sugar and soil samples (Edfu factories). *Food Chemistry*, 65(4): 503-507.
- Muchuweti, M. et al., 2006. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(1): 41-48.
- Oliveira, F.C. and Mattiazzi, M.E., 2001. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrofico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-acucar.; Heavy metal mobility in a Typic Hapludox amended with sewage sludge and planted to sugarcane. *Scientia Agricola*, 58(4): 807-812.
- Oliveira, F.C., Mattiazzi, M.E., Marciano, C.R. and Abreu-Junior, C.H., 2002. Fitodisponibilidade e teores de metais pesados em um Latossolo Amarelo distrofico e em plantas de cana-de-acucar adubadas com composto de lixo urbano.; Phytoavailability and heavy metal content in dystrophic red latosol and in sugarcane

- plants fertilized with urban waste compost. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 26(3): 737-746.
- Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD IRAT, Montpellier, 438 pp.
- Rayment, G.E., Jeffrey, A.J. and Barry, G.A., 2002. Heavy metals in Australian sugarcane. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(15/18): 3203-3212.
- Segura-Munoz, S.I. et al., 2006. Metal levels in sugar cane (*Saccharum spp.*) samples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brazil. *Environment International*, 32(1): 52-57.

9. LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Logigramme de décision (Guide Dérogations ETM, ADEME, APCA).....	9
Figure 2 : La zone d'étude	9
Figure 3 : Cartographie de la zone d'échantillonnage « potentiellement » épandable au vue des distances d'isolement précisées dans l'arrêté du 8 janvier 1998 pour des boues non stabilisées ou non solide. (Sources : IGN MNT, BD TOPO REUNION 97)	12
Figure 4 : Assolement de la zone d'étude. (Source DAF 2006).....	13
Figure 5 : Cartographie de la zone d'échantillonnage.....	14
Figure 6 : Cartographie morpho-pédologique de la zone d'étude (Raunet, 1991)	15
Figure 7 : Répartition des points d'échantillonnage.....	17
Figure 8 : Caractéristiques de la population totale des sols.....	24
Figure 9 : Distribution des échantillons de sol en fonction des gammes de pHeau	26
Figure 10 : Distributions des pH sur la zone d'étude	26
Figure 11 : Concentrations en Cr, Ni, Cu et Zn des sols, classés selon la nature du matériau parental (les UM sont classées par ordre croissant). Les résultats obtenus lors de l'inventaire de 2004 sont juxtaposés aux résultats de cette étude (2007).	27
Figure 12 : Concentrations en ETM des laves issues de la série d'océanites (OS) (symbole blanc : Piton des Neiges, Symbole noir : Piton de la Fournaise) et des laves issues de la série différenciées (symbole blanc : Piton des Neiges) sur la partie gauche du graphe. Les concentrations en ETM des sols mesurés sur des sols issus des matériaux volcaniques du Piton de la Fournaise (PF) et du Piton des Neiges (PdN) sont représentées sur la partie droite du graphique. (Doelsch et al., 2006c)	29
Figure 13 : Concentrations en Cr, Ni, Cu et Zn des sols, classés selon la nature du matériau parental (les UM sont classées par ordre croissant). Les valeurs seuils de l'arrêté du 8 janvier 1998 sont indiquées pour chaque ETM par une ligne en pointillé.....	30
Figure 14 : Répartition des éléments traces métalliques dans le sol.....	33
Figure 15 : Localisation de l'échantillon n°1, commune de Sainte Rose.....	35
Figure 16 : Caractéristiques de la population totale du Cr, Ni, Cu dans la bagasse et le jus des cannes à sucre... 39	
Figure 17: Répartition des teneurs en ETM publiées dans la littérature et des teneurs mesurées sur l'île de la Réunion en 2004 et en 2007. ((Barzegar et al., 2005; Bertoncini et al., 2004; Cunha-Campos and Curtius, 1982; Li et al., 2007; Liu et al., 1994; Mohamed, 1999; Muchuweti et al., 2006; Oliveira and Mattiazzo, 2001; Oliveira et al., 2002; Rayment et al., 2002; Segura-Munoz et al., 2006).....	42
Figure 18 : Teneurs en Cr, Cu, Ni dans la bagasse et le jus de cannes à sucre dans deux sous populations : les cannes à sucre se développant sur des sols ayant une teneur totale en ETM inférieure à la valeur seuil (à gauche en rouge), et des sols ayant une teneur totale supérieure au seuil (à droite en vert).....	44

10. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : valeurs limites de concentration en ETM dans les sols destinés à l'épandage des boues de STEP (France et UE)	7
Tableau 2 : Descriptions et nombre d'échantillons prélevés sur les sols issus des formations superficielles	15
Tableau 3 : Descriptions et nombre d'échantillons prélevés sur les sols issus des matériaux volcaniques.....	16
Tableau 4 : Caractéristiques de la population totale des sols.	23
Tableau 5 : Comparaison des teneurs en ETM des sols échantillonnés avec les valeurs limites fixées par l'arrêté du 8 janvier 1998	26
Tableau 6 : teneurs mesurées dans les éluats de l'essai de lixiviation.....	34
Tableau 7 : Comparaison des teneurs totales en ETM (en ppm) de l'échantillon 1, et des échantillons de sol appartenant à l'UM 50.....	35
Tableau 8 : teneurs mesurées dans les éluats de l'essai d'extraction chimique au nitrate d'ammonium	38
Tableau 9: Caractéristiques de la population totale de bagasses et de jus des cannes à sucre.....	39
Tableau 10 : Concentration de feuilles matures d'espèces variées	40
Tableau 11 : Teneurs en Cr, Cu, Ni dans la bagasse et le jus de canne à sucre dans deux sous populations : les cannes à sucre se développant sur des sols ayant une teneur totale en ETM inférieure à la valeur seuil de l'arrêté du 8 janvier 1998, et des sols ayant une teneur totale supérieure au seuil.....	43

11. ANNEXES

Résultats des analyses de sol :

Identification	TH	pH	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Hg
			mg.kg ⁻¹						
1_BC_ETM	173	5,17	118	134	< 1.0	304	421	0,24	0,16
2_BC_ETM	64,2	6,37	82,9	108	< 1.0	332	407	0,27	0,04
3_BC_ETM	87,3	6,11	80,4	142	< 1.0	1000	565	0,28	0,10
4_BC_ETM	98,8	6,03	101	127	< 1.0	260	435	0,29	0,09
5_BC_ETM	116	5,52	109	132	1,58	316	643	0,25	0,26
6_BC_ETM	94,1	5,58	90,1	139	13,79	448	487	0,25	0,18
7_BC_ETM	61,9	6,11	101,6	169	20,95	170	249	0,27	0,23
8_BC_ETM	45,6	5,28	91,1	197	3,52	190	267	0,10	0,15
9_BC_ETM	47,1	6,76	59,9	168	28,45	140	184	0,30	0,27
11_BC_ETM	70,1	6,81	64,8	131	1,59	602	586	0,26	0,08
12_BC_ETM	89,7	6,5	83,0	132	1,81	373	609	0,25	0,09
13_BC_ETM	84,8	6,1	96,5	135	< 1.0	563	753	0,20	0,09
14_BC_ETM	64,2	5,74	64,0	112	< 1.0	254	372	0,18	0,06
15_BC_ETM	91,1	5,54	86,6	122	4,09	185	341	0,17	0,13
16_BC_ETM	48,2	5,3	106	128	1,54	324	852	0,07	0,15
17_BC_ETM	39,5	6	28,1	135	4,10	107	159	0,23	0,06
18_BC_ETM	84,9	5,98	105	536	93,42	261	558	0,57	0,38
19_BC_ETM	96,8	5,88	120	135	1,27	316	974	0,16	0,25
20_BC_ETM	106	5,47	96,5	146	6,02	266	506	0,34	0,20
21_BC_ETM	110	5,02	92,1	131	< 1.0	251	531	0,23	0,39
22_BC_ETM	44,5	5,11	94,3	194	9,07	294	420	0,09	0,07
23_BC_ETM	86,8	5,48	94,9	132	8,19	289	466	0,25	0,27
24_BC_ETM	105	5,54	86,1	211	9,19	242	429	0,35	0,22
26_BC_ETM	120	5,36	74,2	110	3,52	156	300	0,25	0,22
27_BC_ETM	56,5	4,57	35,0	162	3,44	65	200	0,12	0,26
28_BC_ETM	45,8	4,89	19,4	178	< 1.0	49	128	0,10	0,19
29_BC_ETM	60,2	5,58	44,3	136	5,94	156	228	0,23	0,16
30_BC_ETM	60,7	5,3	133	172	< 1.0	520	804	0,19	0,16
31_BC_ETM	165	5,71	87,5	107	< 1.0	266	533	0,13	0,43
32_BC_ETM	52,9	4,9	68,5	113	2,72	130	444	0,10	0,20
33_BC_ETM	47,3	4,99	66,8	114	4,77	142	480	0,07	0,18
34_BC_ETM	60,0	5,23	66,2	131	< 1.0	253	275	0,17	0,09
35_BC_ETM	76,5	5,65	88,7	134	5,84	288	454	0,23	0,17
36_BC_ETM	34,1	5,35	34,8	110	5,60	171	230	0,18	0,04
37_BC_ETM	81,7	5,87	48,5	151	6,53	145	256	0,24	0,21
38_BC_ETM	72,7	4,71	53,8	150	5,34	181	332	0,21	0,20
39_BC_ETM	34,9	5,26	53,9	152	38,39	54	138	0,14	0,20
40_BC_ETM	35,9	4,64	57,0	171	10,17	64	106	0,09	0,20
41_BC_ETM	45,2	5,02	4,65	160	3,50	11	50	0,15	0,33
42_BC_ETM	40,5	5,1	11,9	157	< 1.0	21	66	0,14	0,25
43_BC_ETM	52,2	4,94	9,50	154	< 1.0	13	60	0,16	0,28
44_BC_ETM	24,9	5,69	33,3	120	5,83	134	171	0,21	0,05
45_BC_ETM	30,7	5,64	35,2	151	14,01	174	239	0,19	0,03

Identification	TH	pH	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Hg
			mg.kg ⁻¹						
46_BC_ETM	45,7	4,64	10,4	142	2,44	21	145	0,10	0,26
47_BC_ETM	42,2	4,9	12,7	204	9,94	29	45	0,14	0,14
48_BC_ETM	35,6	4,55	70,5	176	3,36	76	108	0,10	0,16
49_BC_ETM	38,1	4,84	79,5	230	8,45	67	54	0,12	0,30
50_BC_ETM	40,0	5,14	89,1	218	< 1.0	126	165	0,14	0,04
51_BC_ETM	74,0	5,06	107	144	3,06	295	494	0,26	0,25
52_BC_ETM	88,9	5,48	88,9	150	4,97	287	486	0,31	0,25
53_BC_ETM	45,6	4,47	28,5	173	4,62	102	162	0,10	0,07
54_BC_ETM	30,9	7,11	90,3	193	10,60	251	381	0,19	0,15
55_BC_ETM	40,2	6,04	40,6	204	11,77	69	102	0,32	0,09
56_BC_ETM	41,2	5,89	13,8	149	3,96	25	92	0,16	0,26
57_BC_ETM	40,4	5,45	17,1	206	3,21	99	175	0,14	0,13
58_BC_ETM	37,6	5,31	58,3	160	7,24	70	133	0,14	0,19
59_BC_ETM	36,5	5,15	46,5	141	3,33	67	129	0,12	0,21
60_BC_ETM	38,0	5,08	45,9	124	4,72	79	164	0,13	0,19
61_BC_ETM	128	5,79	86,3	105	2,18	263	487	0,23	0,07

Résultats du test de lixiviation et des extractions chimiques :

	Lixiviation (en µg/L)					Extraction (en µg/L)				
	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd
1_BC_ETM	<1	<30	25,03	<0,2	0,53	13,15	119,84	421,70	7,30	7,93
2_BC_ETM	<1	31,20	4,54	<0,2	<0,1	4,66	119,24	132,68	< 1.0	1,29
3_BC_ETM	<1	<30	4,55	<0,2	0,10	1,89	36,26	142,06	< 1.0	1,97
4_BC_ETM	<1	<30	0,57	<0,2	<0,1	2,37	26,16	27,33	< 1.0	2,23
5_BC_ETM	<1	<30	8,52	<0,2	0,26	3,31	27,36	108,38	< 1.0	2,66
6_BC_ETM	<1	<30	12,30	<0,2	0,23	2,98	33,90	157,99	1,23	2,34
7_BC_ETM	<1	51,50	0,67	<0,2	0,83	11,89	62,76	17,94	< 1.0	1,37
8_BC_ETM	1,82	44,47	7,27	<0,2	0,14	24,69	689,67	64,51	< 1.0	1,56
9_BC_ETM	1,44	<30	<0,5	<0,2	<0,1	5,69	25,39	5,63	< 1.0	0,43
11_BC_ETM	<1	<30	2,97	<0,2	<0,1	4,04	34,16	69,52	< 1.0	1,44
12_BC_ETM	<1	30,60	2,28	<0,2	<0,1	2,06	19,53	66,70	< 1.0	1,79
13_BC_ETM	<1	<30	2,73	<0,2	<0,1	2,99	27,19	110,47	< 1.0	1,84
14_BC_ETM	<1	31,30	7,51	<0,2	0,24	3,66	50,35	80,61	< 1.0	1,46
15_BC_ETM	<1	93,43	11,07	<0,2	0,35	4,91	253,57	84,76	1,01	1,78
16_BC_ETM	<1	32,70	1,19	<0,2	<0,1	3,27	57,27	22,18	< 1.0	0,49
17_BC_ETM	<1	<30	<0,5	<0,2	<0,1	1,32	43,01	12,61	< 1.0	0,89
18_BC_ETM	<1	540,50	3,03	<0,2	0,43	4,67	6290,17	50,99	0,81	5,52
19_BC_ETM	<1	37,60	5,75	<0,2	<0,1	2,18	20,69	87,04	< 1.0	0,61
20_BC_ETM	<1	55,33	9,09	<0,2	0,31	2,74	65,97	126,07	< 1.0	3,23
21_BC_ETM	<1	<30	14,70	<0,2	0,34	1,04	25,93	80,16	< 1.0	1,61
22_BC_ETM	<1	<30	10,56	<0,2	0,31	35,08	310,72	86,18	1,16	3,65
23_BC_ETM	<1	<30	2,76	<0,2	0,18	3,20	32,90	63,16	< 1.0	3,16
24_BC_ETM	<1	90,53	10,50	<0,2	0,45	3,89	535,77	102,54	< 1.0	3,21
26_BC_ETM	<1	<30	12,83	<0,2	0,40	3,89	65,07	112,38	< 1.0	2,32
27_BC_ETM	<1	<30	6,12	<0,2	0,38	3,28	67,73	22,60	< 1.0	0,86
28_BC_ETM	<1	<30	3,26	<0,2	0,22	1,14	51,80	15,17	< 1.0	0,74
29_BC_ETM	<1	<30	1,12	<0,2	0,13	2,58	73,51	24,36	1,22	1,44
30_BC_ETM	<1	<30	13,87	<0,2	0,28	12,09	129,85	183,66	1,05	4,87
31_BC_ETM	<1	<30	4,38	<0,2	<0,1	1,50	16,57	45,87	< 1.0	0,49
32_BC_ETM	<1	<30	3,98	<0,2	0,15	11,28	63,37	37,17	< 1.0	1,33
33_BC_ETM	<1	<30	6,03	<0,2	0,18	4,20	45,58	33,43	< 1.0	1,01
34_BC_ETM	<1	<30	9,44	0,24	0,35	3,24	31,53	58,74	< 1.0	1,25
35_BC_ETM	<1	<30	1,59	<0,2	<0,1	2,22	37,60	38,66	< 1.0	1,04
36_BC_ETM	<1	<30	2,73	<0,2	0,19	1,19	42,44	68,64	< 1.0	2,99
37_BC_ETM	2,31	<30	0,91	0,43	<0,1	6,29	20,57	6,94	< 1.0	< 0.5
38_BC_ETM	<1	<30	13,40	0,22	0,67	4,24	40,91	73,31	3,22	2,70
39_BC_ETM	<1	<30	0,94	<0,2	0,15	2,55	52,76	13,97	< 1.0	1,28
40_BC_ETM	<1	<30	4,45	<0,2	0,56	2,23	43,53	20,06	< 1.0	1,73
41_BC_ETM	<1	<30	4,41	<0,2	0,42	<1	33,69	6,13	< 1.0	1,24
42_BC_ETM	<1	<30	0,73	<0,2	0,30	<1	17,44	7,19	< 1.0	1,29
43_BC_ETM	2,53	<30	1,11	<0,2	0,41	<1	28,69	7,72	< 1.0	1,19
44_BC_ETM	<1	<30	<0,5	<0,2	<0,1	1,04	18,62	18,06	< 1.0	1,34
45_BC_ETM	2,73	<30	0,79	<0,2	0,13	1,16	146,70	27,22	< 1.0	2,47
46_BC_ETM	<1	<30	2,32	<0,2	0,97	<1	22,00	6,23	< 1.0	1,36
47_BC_ETM	<1	<30	0,80	<0,2	0,64	1,05	622,80	12,21	< 1.0	3,85
48_BC_ETM	1,76	31,90	5,09	<0,2	0,44	16,53	115,01	39,96	< 1.0	1,27
49_BC_ETM	1,25	69,97	5,34	<0,2	0,62	27,38	1254,71	57,34	< 1.0	3,47

	Lixiviation (en µg/L)					Extraction (en µg/L)				
	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd
50_BC_ETM	<1	<30	2,14	<0,2	0,30	43,09	671,97	45,75	< 1.0	5,55
51_BC_ETM	<1	<30	8,42	<0,2	0,47	4,60	23,54	132,89	2,23	4,05
52_BC_ETM	<1	<30	2,71	0,55	0,14	1,62	62,06	66,92	< 1.0	1,62
53_BC_ETM	1,24	67,63	12,33	<0,2	0,69	19,49	467,99	135,29	2,40	6,46
54_BC_ETM	<1	<30	<0,5	1,10	<0,1	6,98	19,42	9,39	< 1.0	< 0.5
55_BC_ETM	<1	<30	<0,5	<0,2	<0,1	2,11	170,01	52,46	< 1.0	3,69
56_BC_ETM	<1	<30	<0,5	<0,2	0,15	<1	22,65	12,38	< 1.0	0,98
57_BC_ETM	<1	<30	2,84	<0,2	0,34	<1	96,41	34,72	< 1.0	3,77
58_BC_ETM	<1	<30	2,11	<0,2	0,27	4,64	61,27	26,38	< 1.0	1,80
59_BC_ETM	<1	<30	3,02	<0,2	0,16	1,67	17,09	21,05	< 1.0	0,66
60_BC_ETM	<1	<30	5,21	<0,2	0,38	5,08	23,26	33,83	< 1.0	1,80
61_BC_ETM	<1	<30	5,60	<0,2	0,12	6,11	46,01	111,95	< 1.0	1,04

Résultats des analyses d'ETM dans la bagasse

Identification	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	TS	Variété
	mg.kg ⁻¹							
Ba-1-BC-ETM	2,0	5,7	1,5	0,3	0,3	0,018	51,8%	570
Ba -3-BC-ETM	2,1	6,1	1,8	0,4	0,2	< 0.01	53,3%	570
Ba-4-BC-ETM	2,0	8,5	0,6	0,3	0,3	0,024	55,8%	570
Ba-5-BC-ETM	2,7	5,7	1,4	0,3	0,2	0,011	53,8%	570
Ba-6-BC-ETM	1,8	9,3	0,5	0,2	0,2	0,015	55,6%	570
Ba-8-BC-ETM	2,8	11,7	0,79	0,70	0,29	0,012	50,1%	579
Ba-9-BC-ETM	2,2	9,3	3,5	0,3	0,1	0,011	51,4%	579
Ba-11-BC-ETM	1,8	9,6	0,6	0,4	0,3	0,018	55,2%	570
Ba-12-BC-ETM	3,0	9,3	0,8	0,7	0,3	0,017	50,9%	579
Ba-13-BC-ETM	2,3	8,3	0,88	0,54	0,41	0,010	52,7%	570
Ba-14-BC-ETM	2,4	8,4	1,5	0,3	0,3	0,011	54,6%	570
Ba-15-BC-ETM	2,1	8,0	0,5	0,4	0,4	0,021	55,4%	570
Ba-17-BC-ETM	1,2	7,1	5,3	0,3	0,3	0,018	53,2%	570
Ba-18-BC-ETM	2,6	16,6	0,9	0,9	2,3	0,032	51,8%	579
Ba -19-BC-ETM	2,9	9,6	1,1	0,5	< 0.1	0,011	51,8%	579
Ba-20-BC-ETM	2,3	27,1	0,3	0,7	0,8	0,028	52,0%	570
Ba-21-BC-ETM	2,3	5,6	3,8	0,4	0,3	0,011	47,5%	579
Ba-23-BC-ETM	2,1	9,6	0,3	0,5	0,2	0,018	55,1%	579
Ba-24-BC-ETM	2,8	16,7	1,2	0,4	0,5	0,018	53,5%	570
Ba-26-BC-ETM	2,2	8,1	0,3	0,4	0,7	0,012	53,3%	570
Ba-30-BC-ETM	2,2	9,2	2,8	0,5	0,5	0,024	51,0%	579
Ba-32-BC-ETM	2,4	6,2	0,55	0,49	0,28	0,010	50,8%	579
Ba-33-BC-ETM	2,5	7,9	1,7	0,5	0,3	0,02	58,1%	570
Ba-34-BC-ETM	2,1	7,1	0,72	0,43	0,28	0,014	51,0%	570
Ba -35-BC-ETM	2,4	5,9	1,1	0,4	0,2	0,013	51,3%	579
Ba-36-BC-ETM	1,9	20,6	1,4	0,6	0,6	0,013	54,1%	579
Ba-37-BC-ETM	1,1	4,5	1,2	0,5	0,3	0,01	50,7%	570
Ba-38-BC-ETM	1,8	5,6	4,2	0,4	0,3	0,016	52,1%	579
Ba-39-BC-ETM	2,5	11,7	0,4	0,4	0,4	0,026	51,1%	579
Ba-40-BC-ETM	2,4	9,5	0,2	0,3	0,3	0,012	50,7%	579
Ba-41-BC-ETM	1,8	11,3	1,4	0,3	0,3	0,012	50,0%	579
Ba-42-BC-ETM	1,8	6,7	0,6	0,4	0,5	0,010	52,7%	579
Ba-43-BC-ETM	1,1	7,8	0,6	0,6	0,3	0,011	50,4%	579
Ba-44-BC-ETM	1,6	6,1	0,6	0,4	0,3	< 0.01	50,6%	579
Ba -45-BC-ETM	1,5	10,8	0,6	0,4	0,4	0,019	52,3%	570
Ba-46-BC-ETM	2,2	19,1	4,8	0,4	0,2	0,044	50,0%	570
Ba-47-BC-ETM	2,3	30,6	4,1	0,4	0,3	0,015	54,2%	570
Ba-48-BC-ETM	2,6	10,4	1,9	0,6	0,3	0,015	52,2%	579
Ba-49-BC-ETM	2,4	20,6	1,55	0,48	0,31	0,019	49,6%	579
Ba-50-BC-ETM	2,6	29,0	0,2	0,3	0,3	0,024	51,5%	570
Ba-51-BC-ETM	1,8	4,4	0,3	0,4	0,1	0,012	56,3%	570
Ba-52-BC-ETM	2,1	7,9	1,8	0,5	0,1	0,011	52,2%	579
Ba -54-BC-ETM	2,0	13,3	1,0	0,5	0,4	< 0.01	52,2%	579

Identification	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	TS	Variété
	mg.kg ⁻¹							
Ba-55-BC-ETM	1,8	10,3	0,1	0,5	0,4	0,025	50,8%	579
Ba -56-BC-ETM	2,5	11,4	0,7	0,3	0,4	0,016	51,3%	579
Ba-57-BC-ETM	2,3	10,2	2,5	0,5	0,3	0,020	51,9%	579
Ba-58-BC-ETM	2,8	13,2	2,8	0,3	0,4	0,021	50,4%	579
Ba-59-BC-ETM	2,8	10,1	3,7	0,7	1,1	0,019	51,6%	579
Ba-60-BC-ETM	2,4	7,2	1,1	0,4	0,3	0,029	53,9%	579
Ba-61-BC-ETM	2,6	10,7	1,4	1,1	0,3	0,014	53,0%	570

Résultats des analyses d'ETM dans le jus de la canne à sucre

Identification	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	TS	Variété
	mg.kg ⁻¹							
Jus-1-BC-ETM	2,1	9,0	1,3	0,4	0,5	0,015	13,7%	570
Jus-3-BC-ETM	0,8	8,1	0,9	0,3	0,3	0,01	16,0%	570
Jus-4-BC-ETM	2,9	12,3	0,6	0,4	0,1	0,012	14,2%	570
Jus-5-BC-ETM	1,5	4,4	1,3	0,3	< 0.1	0,005	13,8%	570
Jus-6-BC-ETM	2,7	11,5	0,5	0,6	0,2	0,014	14,3%	570
Jus-8-BC-ETM	1,8	9,0	3,7	0,3	0,2	0,007	14,5%	579
Jus-9-BC-ETM	1,5	4,8	0,6	0,4	0,3	0,006	15,0%	579
Jus-11-BC-ETM	2,1	12,6	0,8	0,6	0,3	0,016	13,4%	570
Jus-12-BC-ETM	2,4	9,8	1,0	0,9	0,2	0,009	11,2%	579
Jus-13-BC-ETM	3,0	11,3	0,4	0,5	< 0.1	0,010	14,6%	570
Jus-14-BC-ETM	1,9	7,6	1,1	0,3	< 0.1	0,011	17,2%	570
Jus-15-BC-ETM	3,3	9,7	0,8	0,3	0,1	0,015	15,8%	570
Jus-17-BC-ETM	1,6	10,8	0,8	0,4	0,1	0,014	14,4%	570
Jus-18-BC-ETM	3,8	22,5	0,5	0,5	0,8	0,037	14,8%	579
Jus-19-BC-ETM	3,5	13,5	0,7	0,4	0,1	0,017	17,0%	579
Jus-20-BC-ETM	3,6	14,0	0,8	0,4	0,3	0,030	13,2%	570
Jus-21-BC-ETM	2,6	7,3	0,9	0,3	0,4	0,018	14,0%	579
Jus-23-BC-ETM	3,1	10,0	0,6	0,3	0,3	0,022	15,6%	579
Jus-24-BC-ETM	4,7	20,8	0,9	0,3	0,4	0,022	13,6%	570
Jus-26-BC-ETM	1,8	6,8	0,6	0,4	0,2	0,019	13,2%	570
Jus-30-BC-ETM	0,8	7,7	1,0	0,3	0,1	0,023	14,2%	579
Jus-32-BC-ETM	1,7	4,2	0,4	0,3	0,1	0,008	15,1%	579
Jus-33-BC-ETM	1,2	9,7	0,7	0,3	0,3	0,01	13,9%	570
Jus-34-BC-ETM	1,6	7,2	1,0	0,4	0,2	0,019	17,4%	570
Jus-35-BC-ETM	3,0	6,6	1,3	0,3	0,3	0,016	16,4%	579
Jus-36-BC-ETM	1,5	5,5	1,4	0,3	0,0	0,016	14,6%	579
Jus-37-BC-ETM	0,6	5,1	1,1	0,3	0,3	0,03	14,9%	570
Jus-38-BC-ETM	2,3	4,2	0,7	0,5	0,3	0,013	15,4%	579
Jus-39-BC-ETM	2,3	10,1	3,2	0,2	0,3	0,035	15,0%	579
Jus-40-BC-ETM	1,1	5,4	1,1	0,2	0,3	0,002	17,0%	579
Jus-41-BC-ETM	1,1	5,5	1,1	0,4	0,4	0,010	16,1%	579
Jus-42-BC-ETM	1,9	7,2	2,4	0,3	0,4	0,018	16,5%	579
Jus-43-BC-ETM	0,6	7,0	0,9	0,6	0,7	0,015	15,7%	579
Jus-44-BC-ETM	0,6	5,9	0,7	0,3	0,4	0,01	17,5%	579
Jus-45-BC-ETM	0,8	6,4	0,6	0,2	0,4	0,021	15,3%	570
Jus-46-BC-ETM	1,9	20,3	0,7	0,3	0,3	0,063	14,6%	570
Jus-47-BC-ETM	2,5	10,5	1,9	0,4	0,2	0,012	12,4%	579
Jus-48-BC-ETM	2,9	31,8	0,4	0,4	0,1	0,018	15,1%	579
Jus-49-BC-ETM	3,0	19,6	0,5	0,3	0,2	0,017	16,1%	570
Jus-50-BC-ETM	3,2	19,6	0,5	0,3	0,1	0,021	14,6%	570
Jus-51-BC-ETM	1,4	4,2	0,5	0,4	0,3	0,014	15,6%	570
Jus-52-BC-ETM	2,8	10,8	0,4	0,4	0,2	0,014	15,1%	579
Jus-54-BC-ETM	1,9	11,3	0,5	0,3	0,2	< 0.01	15,7%	579
Jus-55-BC-ETM	1,1	8,8	0,6	0,3	0,1	0,013	12,8%	579

Identification	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	TS	Variété
	mg.kg ⁻¹							
Jus-56-BC-ETM	1,5	18,5	0,4	0,3	< 0.1	0,012	15,6%	579
Jus-57-BC-ETM	1,4	6,8	0,3	0,3	0,1	0,009	14,8%	579
Jus-58-BC-ETM	1,7	8,6	0,4	0,3	0,2	0,017	14,8%	579
Jus-59-BC-ETM	2,4	7,8	0,3	0,3	0,1	0,015	15,9%	579
Jus-60-BC-ETM	1,6	7,3	0,3	0,3	< 0.1	0,015	13,5%	579
Jus-61-BC-ETM	5,1	19,1	0,7	0,5	0,3	0,021	11,8%	570